

Università degli studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE Corso di laurea magistrale in Ingegneria Elettronica

Tesi di laurea magistrale

Studio dell'affidabilità e caratterizzazione dei fenomeni di intrappolamento di carica in dispositivi in diamante per applicazioni di potenza

Candidato: Pavanello Luca Relatore: Prof. Meneghini Matteo

Correlatore: Dott. De Santi Carlo

Indice

In	trod	uzione 1						
1	Il D	Diamante 5						
	1.1	Struttura cristallina						
	1.2	Sintesi del diamante						
	1.3	Proprietà del diamante						
	1.4	Applicazioni del diamante 12						
2	Dis	Dispositivi MESFET in diamante 1						
	2.1	MESFET						
	2.2	Struttura del MESFET						
	2.3	Prestazioni dei MESFET						
	2.4	Struttura dei MESFET in esame 19						
	2.5	Diagramma a bande						
	2.6	Difetti						
	2.7	Effetti di canale corto						
3	Pri	mo set di campioni 29						
	3.1	Campioni						
	3.2	Caratterizzazione DC						
	3.3	$I_d - V_d \in I_d - V_q$ campionate rapide						
	3.4	$I_d - V_d \in I_d - V_q$ campionate rapide al variare della temperatura 35						
	3.5	Step-Stress						
		3.5.1 Step-Stress in SEMI-ON-State						
		3.5.2 Step-Stress in OFF-Sate						
		3.5.3 Step-Stress in ON-State						
4	Sec	ondo set di campioni 63						
	4.1	Campioni						
	4.2	Caratterizzazione DC						
	4.3	Radiazione di frenamento 67						

4.4	4.4 Step-Stress con electroluminescenza					
	4.4.1	Strep-Stress con elettroluminescenza in OFF-State	. 70			
	4.4.2	Strep-Stress con elettroluminescenza in ON-State	. 79			
4.5	Strep-St	tress con elettroluminescenza con EL-bell	. 87			
	4.5.1	Strep-Stress con elettroluminescenza con EL-bell in OFI	F-			
	(State	. 88			
	4.5.2	Strep-Stress con elettroluminescenza con EL-bell in ON-	-			
	C h	State	. 94			
4.6	Constar	nt Stress	. 101			
Conclu	isioni		117			
Bibliog	grafia		121			

iv

Introduzione

Le applicazioni ad alta frequenza ed alta potenza sono soggette ad un continuo sviluppo e trovano una diffusione sempre più crescente in diversi ambiti: nelle telecomunicazioni, nei sistemi di comunicazione e di accesso a reti senza fili a banda larga, nelle comunicazioni satellitari, nei campi della sicurezza e dei sistemi *electronic warfare* (es. radar), nella radio astronomia, ecc.

La continua domanda di prestazioni in tali campi ha spinto la ricerca e lo sviluppo di nuovi materiali da impiegare nei dispositivi che compongono le suddette applicazioni, in grado di superare alcune limitazioni incontrate con il silicio; il silicio è infatti il materiale capostipite nella tecnoogia dei circuiti integrati, che però non riesce a soddisfare i nuovi requisiti richiesti di elevata potenza e frequenza operative, di alta efficienza ed affidabilità e stabilità alle alte temperature.

Nel corso degli ultimi anni sono stati quindi studiati e sviluppati alcuni semiconduttori composti, quali GaAs, InP, SiGe, SiC, GaN; fra questi il nitruro di gallio e il carburo di silicio si sono presentati come i materiali più promettenti. Con il passare del tempo è sempre più importante trovare materiali con prestazioin migliori per rendere i sitemi più efficienti dal punto di vista del risparmio energetico e di risorse, ma i materiali attualmente utilizzati cominciano a non essere più compatibili con tali richieste, quindi bisogna sviluppare un nuovo semiconduttore in grado di soddisfare le nuove richieste. Uno dei nuovi materiali che si sta studiando è il diamante, il quale possiede alcuni vantaggi teorici rispetto al GaN e al SiC quindi riesce a soddisfare anche le specifiche che il nitruro di gallio e il carburo di silicio non sono in grado di soddisfare.

Il diamante è un semiconduttore composto da atomi di carbonio, che gode di valori elevati di mobilità e di velocità di saturazione dei portatori, che lo rendono adatto ad applicazioni ad alte frequenze. Inoltre il diamante presenta un elevato energy gap, che gli consente di ottenere valori elevati per il campo elettrico di breakdown, offrendo la possibilità di operare a tensioni maggiori e permettendo così un forte incremento della potenza gestibile dai dispositivi (o ugualmente la creazione di dispositivi più piccoli a parità di potenza). In aggiunta il diamante presenta la conducibilità termica maggiore tra tutti i semiconduttori studiati, questo consente di gestire situazioni dove la potenza in gioco è elevata, inoltre tale materiale può essere utilizzato in applicazioni dove la temperatura è elevata in quanto questo materiale gode di una grande stabilità ad alte temperature. Tali caratteristiche fanno del diamante uno dei materiali che in un futuro non troppo lontano potrebbe andare a sostituire i materiali attualmente utilizzati in aplicazioni dove sono richieste una elevata frequenza e potenza di funzionamento oppure in applicazioni dove la temperatura di funzionamento raggiunge valori elevati.

I dispositivi utilizzati per queste applicazioni sono principalmente ME-SFET (MEtal Semiconductor Field Effect Transistor). Il funzionamento di questi dispositivi è basato sulla realizzazione di un contatto Schottky metallosemiconduttore, con la possibilità di controllare un canale condutivo formato su un substrato omogeneo. Andando a terminare la superficie del diamante con ossigeno o idrogeno si può formare un canale conduttivo bidimensionale di elettroni e di lacune rispettivamete con una concentrazione molto elevata. L'utilizzo del diamante come semiconduttore è studiato da molto tempo, di recente ci sono stati alcuni sviluppi che hanno portato a dispositivi che mostrano un funzionamento accettabile, quindi particolari studi sulle caratteristiche di questi nuovi materiali devono ancora essere eseguiti. In questo lavoro vengono svolte delle analisi per studiare l'affidabilità dei dispositivi in diverse condizioni di funzionamento e poi vengono eseguite misure per andare a studiare i fenomeni di intrappolamento di carica negli stati trappola presenti nel materiale.

Nel **capitolo 1** viene descritto il materiale che costituisce i dispositivi in esame: il diamante; ne vengono riportate la struttura cristallina, il diagramma energia-numero d'onda, le principali tecniche per la sintesi del diamante, le principali proprietà elettroniche e ottiche. Infine viene fornita una panoramica di quelli che sono i principali campi di utilizzo del materiale in esame.

Nel **capitolo 2** è trattato il tipo di dispositivi realizzati in diamante, i MESFET; ne sono descritte le strutture e le principali caratteristiche; inoltre è riportato anche il procedimento per la realizzazione dei dispositivi in esame e i diagrammi a bande che aiutano a capire il funzionamento di tali dispositivi.

Nel **capitolo 3** vengono inizialmente descritti i campioni presenti nel primo wafer studiato, la convenzione utilizzata per identificare i dispositivi ed il setup utilizzato per eseguire le misure. In questo capitolo vengono descritte anche le misure effettuate su alcuni dispositivi presenti nel wafer, iniziando dalla caratterizzazione DC eseguita per testare quali campioni erano inizialmente funzionanti; si è passati poi ad eseguire delle $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide per andare a studiare i fenomeni di intrappolamento di carica. Infine sono stati eseguiti tre stress in tre diverse condizioni di funzionamento per andare a studiare l'affidabilità dei dispositivi. All'interno del capitolo vengono anche descritti ed analizzati i risultati ottenuti nelle varie misure.

Nel **capitolo 4** vengono inizialmente descritti i campioni presenti nel secondo wafer studiato, la convenzione utilizzata per identificare i dispositivi ed il setup utilizzato per eseguire le misure. In questo capitolo vengono descritte anche le misure effettuate su alcuni dispositivi presenti nel wafer, iniziando dalla caratterizzazione DC eseguita per testare quali campioni erano inizialmente funzionanti; si è passati poi ad eseguire due stress in due diverse condizioni di funzionamento (OFF-State e ON-State) andando a monitorare l'elettroluminescenza prodotta dal dispositivo. In seguito sono stati eseguiti due stress in due diverse condizioni di funzionamento (OFF-State e ON-State) andando a monitorare come variano le caratteristiche del dispositivo e la campana di elettroluminescenza. Infine è stato eseguito uno stress in ON-State andando ad aumentare il tempo nel quale il dispositivo è mantenuto sotto stress per andare a monitorare l'affidabilità del dispositivo. All'interno del capitolo vengono anche descritti ed analizzati i risultati ottenuti nelle varie misure.

Capitolo 1 Il Diamante

In questo capitolo verranno fornite le nozioni di base sul materiale su cui si basano i transistor in esame, ovvero il diamante, illustrando le principali proprietà come semiconduttore e i meccanismi di crescita.

Il diamante usato per applicazioni industriali è molto apprezzato per la sua combinazione di durezza e resistenza all'usura. Però, è da tempo riconosciuto che il diamante possiede altre proprierà importanti, proprietà ottiche, termiche, elettrochimiche, chimiche ed elettroniche. Combinando queste proprietà si può utilizzare il diamante in molti campi quali l'elettronica di potenza, la sensoristica e la rilevazione di fotoni.

1.1 Struttura cristallina

Il diamante è un materiale composto da atomi ci carbonio (C) che sono legati in una struttura tetraedrica con gli orbitali esterni ibridizzati sp^3 , i quali formano una struttura definita cubica a facce centrate con lunghezza del lato $a_0 = 0.357nm$. Inoltre, ogni cella primitiva consite in due atomi di carbonio. La struttura può essere vista come due strutture cubiche a facce centrate dove una compenetra nell'altra lungo la diagonale della cella unitaria [25].

Essendo la struttura cristallina cubica, i coefficienti reticolari risultano essere a = b = c e $\alpha = \beta = \gamma = 90^{\circ}$. Le costanti a, b e c indicano le dimensioni tra due atomi rispettivamente per lunghezza, larghezza e spessore, mentre le costanti α , β e γ indicano gli angoli che formano gli spigoli del reticolo presi a coppie. Le proprietà elettroniche del materiale sono fortemente legate ai valori assunti dalle costanti reticolari. Ad esempio all'aumentare della temperatura il reticolo si espande aumentando i valori dei coefficienti a, b e c e questo comporta una diminuzione dell'energy gap. Il diamante presenta una struttura a gap indiretto, cioè il massimo della banda di valenza non si trova



Figura 1.1: Cella elementare del diamante

in corrispondenza con il minimo della banda di conduzione. Come si può vedere dalla figura 1.2, il massimo della banda di valenza si ha per $\mathbf{k} = 0$, mentre il minimo della banda di conduzione si trova a $\mathbf{k} = 0.76$. Dalla figura 1.2 si può vedere che l'energy gap, definito come la differenza in energia tra il massimo della banda di valenza e il minimo della banda di conduzione, è di 5.5 eV.

1.2 Sintesi del diamante

Per la sintesi del diamante che poi verrà utilizzato per la fabbricazione dei dispositivi basati su questo materiale ci sono principalmente due meccanismi, il primo si chiama High Pressure High Temperature (HPHT) mentre il secondo è la crescita del diamante da una fase gassosa.

Per quanto riguarda la crescita con il primo metodo, HPHT, consiste nell'andare a costruire la struttura cristallina partendo da soluzione liquida contenente gli atomi di carbonio. Il meccanismo principale che consente la cristallizzazione degli atomi di carbonio sospesi nella soluzione è la differenza della solubilità del diamante nella zona calda della soluzione e nella zona fredda della medesima soluzione. Nella zona fredda viene inserito un elemento fondamentale per la cristallizzazione, cioè viene inserito un pezzo di diamante, chiamato seme, al quale si legano gli atomi di carbonio sospesi nella soluzione. I solventi e i catalizzatori utilizzati per questo tipo di cresci-



Figura 1.2: Diagramma energia-numero d'onda del diamante [22]

ta, generalmente, sono gli stessi di quelli utilizzati per la sintesi spontanea del diamante. I solventi sono scelti in modo tale da avere un equlibrio di diamante liquido nelle due zone della soluzione, per fare in modo che la reazione avvenga e che il carbonio presente nella parte fredda della soluzione vada a legarsi al seme di diamante immerso nella soluzione tutto il sistema deve essere mantenuto ad una pressione di 6 GPa. La soluzione contenente atomi di carbonio può essere composta da due o tre elementi, i sistemi contententi tre elementi presentano vantaggi rispetto a sistemi contenenti due elementi, per esempio nei sistemi ternari è più semplice raggiungere un equilibrio nella concentrazione degli atomi di carbonio nelle due zone della soluzione, rispetto ad un sistema binario. La differenza di temperatura tra la regione calda della soluzione, dove vengono forniti gli atomi di carbonio, e la zona fredda, dove avviene la cristallizzazione del diamante, è tipicamente compresa tra $20-50^{\circ}C$, tale variazione di temperatura è impostata dal sistema che regola anche la pressione a cui mantenere la soluzione. Dal momento della sua introduzione, negli anni '70, questo sistema per la crescita del diamante ha riscosso grande successo ed ad oggi è uno dei metodi di crescita per diamanti di dimensioni relativante elevate più utilizzato.

Questo metodo di crescita ha anche degli svantaggi, uno di questi è la creazione di difetti all'interno del reticolo cristallino. Tali difetti possono essere causati da impurità introdotte nella soluzione, oppure possono eseere difetti puntuali. Infine, il cristallo può contenere anche difetti estesi come per esempio dislocazioni, errori nell'impilamento di due strati consecutivi del diamante e microtwins, cioè uno spostamento di uno strato atomico rispetto allo strato atomico precedente. Tali difetti vanno a degradare la qualità del reticolo cristallino introducendo imperfezioni, che vanno a modificare le caratteristiche elettriche ed ottiche del materiale. Il controllo del numero di difetti che si creano nel diamante è di importanza essenziale in quanto per crescere cristalli di alta qualità la concentrazione di difetti deve essere la più bassa possibile. La maggior parte dei difetti si estende dal seme, oppure può cominciare durante la crescita a causa del legame tra un atomo di carbonio del reticolo con una impurità presente nella soluzione, questo quindi causa la deformazione della struttura, dando origine al difetto. L'utilizzo di semi con una struttura cristallina perfetta fa in modo che la concentrazione di difetti dopo la crescita sia inferiore rispetto al caso in cui il seme di partenza presenti già dei difetti.

Il secondo metodo per la crescita del diamante è quello che parte da una fase gassosa, e si chiama Chemical Vapor Deposition (CVD). Questo metodo permette di crescere il materiale ad una pressione bassa, ed inoltre consente di mantenere la temperatura bassa. Lo svantaggio nell'utilizzare questo metodo di crescita rispetto al metodo precedente è il tempo richiesto per crescere il materiale, in quanto la velocità di crescita con questa tecnica è inferiore a 20nm/h. Il processo CVD è basato sull'attivazione di una piccola quantità di un idrocarburo, tipicamente metano, mischiato con idrogeno H_2 per formare una composizione di atomi di idrogeno H e $C_x H_y$, che sono trasportati per diffusione e convezione fino alla superfice dove deve essere cresciuto il diamante e partecipano alle reazioni chimiche che costruiscono il reticolo cristallino.

Tipicamente per la crescita del diamante si procede partendo con la crescita HPHT in modo tale da riuscire a crescere il substrato in poco tempo, mentre per la crescita della regione attiva si utilizza la tecnica CVD in quanto con questa tecnica la concentrazione dei difetti che si vengono a creare è inferiore rispetto alla concentrazione dei difetti che si crea con la tecnica HPHT. Procedendo in questo modo si sfruttano i vantaggi delle due tecniche andando a minimizzare gli svantaggi, in quanto si riesce a crescere un substrato di alta qualità con dimensioni non troppo piccole in un tempo ragionevole [28]. Per la realizzazione dei dispositivi studiati per questo lavoro il substrato in diamante su cui poi viene applicata la terminazione con l'idrogeno è stato cresciuto con le due tecniche esposte. Il bulk è stato cresciuto con la tecnica HPHT, mentre la regione attiva, dove poi si viene a creare il canale di lacune, è stato cresciuto con la tecnica CVD.

1.3 Proprietà del diamante

I vantaggi nell'utilizzo del diamante come materiale semiconduttore sono dovuti all'elevato valore della tensione di breakdown dovuto all'elevato bandgap che presenta il diamante, 5.5 eV. Un'altra proprietà è l'elevata mobilità degli elettroni e delle lacune all'interno del materiale, inoltre il diamante presenta la conducibilità termica più alta tra i materiali conosciuti. Avere un valore elevato di conducibilità termica è di particolare importanza in quanto in molte applicazioni di potenza il funzionamento dei dispositivi realizzati in materiali diversi è limitato dalla capacità del semiconduttore utilizzato di rimuovere il calore. Per il successo nell'integrazione di un elemento in grado di smaltire il calore in un dispositivo integrato bisogna considerare tutto il percorso del calore in combinazione con le richieste del percorso che segue la corrente e i punti in cui viene generato il calore. Considerando il diamante, questo presenta una estrema rigidezza e un basso coefficiente di espansione termica, il che rende il diamante un materiale eccellente per essere utilizzato in applicazioni dove la temperatura è elevata. Questa proprietà rende il diamante il materiale di riferimento per applicazioni di potenza in cui la temperatura è elevata, e dove gli altri semiconduttori attualmente utilizzati presentano problemi. Il basso valore della conducibilità termica implica che non si riesce a rimuovere efficentemente il calore, il che comporta un'espansione del reticolo che implica il degrado del materiale e quindi una riduzione del tempo di vita del dispositivo[9].

Il diamante presenta anche alcuni svantaggi, di cui alcuni di questi in futuro potranno essere superati. Uno di questi svantaggi è la possibilità di realizzare un substrato con un'elevata purezza, di dimensioni elevate e con un costo non eccessivo. Un secondo svantaggio è la difficoltà di drogare il materiale. Per il drogaggio del diamante si può preparare un gas contenente il materiale drogante da inserire durante la crescita del film sottile in modo tale da crescere il diamante con al suo interno alcuni atomi del materiale drogante. Negli ultimi anni in questo ambito sono stati fatti dei passi avanti, per rendere il materiale di tipo p, si può drogare il diamante con un gas a base di boro (B), mentre per drogare il materiale di tipo n, si può usare un gas a base di fosforo (P). In alternativa al drogaggio realizzato inserendo atomi estranei a quelli che formano il reticolo cristallino, si può fare in modo di creare un canale di elettroni o di lacune all'interno del diamante andando a terminare la superfice del film sottile con atomi di ossigeno per realizzare un canale di elettroni, invece, per realizzare un canale di lacune si può terminare la superfice con atromi di idrogeno. Il drogaggio del diamante tramite la deposizione di idrogeno o ossigeno sulla superfice è possibile grazie ad un'altra proprietà chiave del materiale in esame, cioè la bassa affinità elettronica. Nel caso dell'idrogeno, questo da luogo ad un gas di lacune bidimensionale (two-dimensional hole gas, 2DHG) che può raggiungere densità di carica dell'ordine di 10^{14} cm^{-2} [15].

Nella tabella 1.1 viene riportato un confronto tra le principali proprietà del diamante e di altri materiali.

Material	WBG		UWBG		
	GaN	4H-SiC	AlGaN/AIN	$B-Ga_2O_3$	Diamond
Bandgap (eV)	3.4	3.3	Up to 6	4.9	5.5
Thermal conductivity (W/mK)	253	370	253-319	11-27	2290-3450
State-of-the-art substrate quality (dislocations per cm ²)	$\simeq 10^4$	$\simeq 10^2$	≃ 10 ⁴	$\simeq 10^4$	$\simeq 10^5$
State-of-the-art substrate diameter (inches)	8 (on Si)	8	2	4	1
Demonstrate p-type dopability	Good	Good	Poor	No	Good
Demonstrate n-type dopability	Good	Good	Moderate	Good	Moderate
Electron mobility (cm²/Vs)	1200-2000	700	1100-1400	200	4500
Breakdown field (*10 ⁶ V/cm)	3.3	3	3.9	5.2	10

Tabella 1.1: Confronto delle principali proprietà di alcuni semiconduttori [15]

Le prime due colonne della tabella contengono due materiali che appartengono al gruppo dei materiali Wide Band Gap (WBG), mentre gli altri tre materiali appartengono al gruppo Ultra Wide Band Gap (UWBG). Nella prima riga si può vedere il band gap espresso in eV, da questa riga si può vedere che tra i materiali che appartengono alla prima categoria e quelli che appartengono alla seconda categoria c'è una differenza di circa 2 eV. Nella seconda riga è riportata la conducibilità termica, da questa riga si può vedere che la conducibilità termica per il diamante è molto maggiore rispetto agli altri materiali, questo implica una capacità maggiore del materiale in esame di rimuovere calore e quindi di poter lavorare a temperature maggiori oppure supportando potenze operative maggiori rispetto agli altri materiali. La terza riga descrive la qualità del substrato in termini di dislocazioni per cm^2 , più alto è il valore, peggiore è il substrato. Come si può notare non si è ancora in grado di realizzare un substrato di ottima qualità per dispositivi in diamante. La quarta riga descrive le dimensioni del diametro dei substrati che si possono realizzare per i diversi materiali, dai valori contenuti in questa riga si può vedere che per materiali che appartengono alla categoria WBG si possono ottenere substrati con diametro relativamente grande, mentre per quanto riguarda il diamante si riescono a realizzare substrati con dimensioni piccole di solo 1 pollice. Per quanto riguarda la quinta e la sesta riga, si può vedere la capacità del materiale di essere drogato di tipo p e drogato di tipo

n. Per questa proprietà ci sono materiali che sono più facili da drogare e materiali che al momento è quasi impossibile riuscire a drogare. Per quanto riguarda il materiale discusso in questo lavoro, dalla tabella si può vedere che il diamante può essere drogato di tipo p con una buona qualità, mentre la realizzazione di un drogaggio di tipo n di buona qualità risulta più complessa. Nella penultima riga è possibile vedere la mobilità degli elettroni nei vari materiali, dai valori si vede che nel diamnate si riescono a raggiungere mobilità maggiori rispetto agli altri materiali. Per quanto riguarda l'ultima riga si vede il campo elettrico di breakdown teorico, dai valori riportati in tabella si vede che il dimante ha il valore più alto tra tutti i materiali, questo implica che si possono raggiungere campi elettrici maggiori prima di arrivare alla rottura del dispositivo. La combinazione tra l'elevato valore della mobilità e del campo elettrico di breakdown (e quindi della tensione applicabile) permette di raggiungere potenze molto elevate rispetto a quelle che si possono raggiungere con gli altri materiali.

Un'altra proprietà del diamante è la sua resistenza meccanica, dovuta all'elevata densità di legami molto forti. A temperature non elevate la rottura avviene principalmente per la propagazione di crepe dovute a difetti introdotti nella fase di crescita del materiale. Il diamante è quindi un materiale molto resistente, ma il suo comportamento è molto sensibile all'applicazione di forze concentrate in una superfice ridotta, perchè, a causa del basso livello di deformazione plastica che possiede questo materiale, il diamante tende a rompersi per forze di intensità ridotta rispetto al caso in cui la forza è applicata su una superfice più ampia [9].

Un'altra classe di proprietà importanti nel diamante sono le proprietà ottiche. Il coefficiente di assorbimento per il diamante intrinseco dall'UV fino a lunghezze d'onda lunghe nell'IR è riportato in figura 1.3. Un'elevata trasparenza spettrale si può vedere anche andando ad estendere il grafico fino a lunghezze d'onda dell'ordine di $500\mu m$, con l'eccezione della zona di assorbimento presente tra $2.5 - 6.5 \mu m$ e sotto il valore del band gap verso i $226 \mu m$. Gli altri materiali che trasmettono nell'infrarosso, come ZnS e ZnSe devono la loro trasparenza agli atomi pesanti e ai deboli legami, il che risulta in una bassa energia dei fononi e quindi una frequenza di cut-off nel lontano infrarosso. Il diamante con il basso valore del peso degli atomi e la rigidità del reticolo cristallino possiede la più alta frequenza di oscillazione dei fononi tra tutti i materiali, con il singolo modo del fonone centrato a 7.5 μm . Mentre il reticolo cristallino rimane privo di difetti, e quindi simmetrico, l'assorbimento a questa frequenza è proibito. L'assorbimento nell'infrarosso è dovuto ai processi che coinvolgono due e tre fononi, e tali processi sono dipendenti dalla temperatura a cui è il diamante.

Il diamante policristallino causa delle perdite significanti a causa dello scat-



Figura 1.3: Spettro di assorbimento di un diamante con elevato livello di purezza dall'UV al medio-IR [9]

tering di Rayleigh a lunghezze d'onda di circa $1\mu m$, quindi per applicazioni nell'UV fino al vicino IR generalmente è richiesto l'utilizzo di un diamante monocristallino.

Per luce con lunghezze d'onda comprese tra il band gap e $25\mu m$, l'indice di rifrazione è uno dei più elevati, infatti, nella parte UV dello spettro, si ha n = 2.6 a $\lambda = 266nm$, mentre il valore cala a n = 2.46 a $\lambda = 405nm$ [9].

1.4 Applicazioni del diamante

La velocità del trasferimento dei dati nelle comunicazioni sta crescendo molto rapidamente. Perciò, componenti elettronici che operano a frequenze elevate e generano potenza di uscita elevate sono urgentemente necessari per i sistemi di comunicazione attuali e per quelli futuri. D'altro canto, da un punto di vista ambientale e risparmio di energia, è richiesto anche un aumento dell'efficienza energetica del semiconduttore. I dispositivi realizzati in diamante soddisfano tutte le richieste.

La potenza di uscita e la frequenza operativa attualmente richieste per alcune specifiche applicazioni e le prestazioni di componenti composti da diversi semiconduttori sono mostrati nella figura 1.4. I cellulari attualmente in uso con sistema di comunicazione 4G richiedono una potenza di uscita di 0.3Wad una frequenza di 3GHz e come amplificatori di potenza utilizzano componenti basati su silicio o arseniuro di gallio (GaAs). Al giorno d'oggi le comunicazioni basate su rete senza fili sono sempre maggiori e l'utilizzo di questo mezzo di trasmisisone anche per altri motivi, per esempio la visione di film, video oppure trasmissioni televisive in streaming, è in costante aumento. Con i sistemi di comunicazioni attualmente utilizzati tra poco tempo non si sarà più in grado di di soddisfare le richieste. Per superare questo problema si sta per introdurre un nuovo sistema di comunicazioni, chiamato 5G, che prevede frequenze operative maggiori rispetto a quelle attualmente utilizzate. Con l'aumento delle frequenze operative si ha un aumento della veelocità nelle comunicazioni, ma con i materiali attualmente utilizzati è molto difficile riuscire a raggiungere le specifiche imposte nel nuovo standard, per questo motivo l'utilizzo di dispositivi in diamante permette di raggiungere frequenze operative molto elevate, frequenze nell'ordine dei 27GHz. Un altro asspetto descritto nello standard del 5G è quello del raggiungimento di una efficienza energetica maggiore rispetto a quella stabilita nello standard 4G attualmente in uso. Anche in questo caso l'utilizzo di dispositivi in diamante permette di raggiungere livelli di efficienza che sarebbero difficili da raggiungere con altri semiconduttori. Amplificatori di potenza basati su arseniuro di gallio sono attualmente utilizzati come amplificatori nelle base station, ma il nitruro di gallio (GaN) recentemente ha iniziato ad essere utilizzato in questa area. Come componenti di potenza è cominciato ad essere utilizzato anche il carburo di silicio (SiC), ma la frequenza operativa di dispositivi basati su SiC è limitata solo a 1GHz a causa della ridotta mobilità dei portatori. D'altro canto, stazioni di trasmissione, satelliti di comunicazione e radar richiedono potenze di uscita e frequenze operative che sono oltre quello che i semiconduttori convenzionali sono in grado di fornire.

Il diamante è chiamato *semiconduttore finale* perchè intrinsecamente ha proprietà fisiche superiori rispetto a tutti gli altri semiconduttori citati in precedenza. Per esempio il band gap del diamante è cinque volte quello del silicio, questo significa che il campo elettrico di breakdown teorico del diamante è 30 volte quello del silicio, e come conseguenza la tensione di uscita può essere impostata nello stesso rapporto. Visto che la potenza è data dal prodotto tra tensione e corrente, la potenza disponibile in uscita è aumentata. Inoltre, la mobilità dei portatori nel diamante è tre volte maggiore rispetto al silicio, questo significa che la resistenza del dispositivo e il consumo di potenza durante la fase operativa del dispositivo è ridotta. Come già detto, il diamante presenta il valore in assoluto più alto per quanto riguarda la conducibilità termica, quindi il diamante presenta la maggiore efficienza per quanto riguarda la dissipazione di calore quando il dispositivo si trova a lavorare in condizioni di alta potenza [19].

Dalla figura 1.4 si può vedere il campo di utilizzo del diamante in di-



Figura 1.4: Potenza di uscita e frequenza di lavoro per componenti in sistemi con diversi semiconduttori [19]

spositivi elettronici, si può vedere che per valori elevati di potenza di uscita l'unico semiconduttore che è in grado di soddisfare le richieste è il diamante, per le sue abilità nel disperdere il calore generato dall'elevato livello di potenza e per l'elevato valore di band gap che fa in modo che il campo elettrico di breakdown sia elevato. Il diamante è anche la scelta migliore nel caso in cui sia richiesta una frequenza operativa elevata con una potenza di uscita relativamente elevata. Quindi viste queste proprietà, dispositivi basati sul diamante possono essere utilizzati in applicazioni come stazioni di trasmissione, satelliti utilizzati per le comunicazioni o radar.

Oltre all'utilizzo del diamante in applicazioni elettroniche in cui è richiesta una elevata potenza di uscita e una elevata frequenza operativa, il diamante può essere utilizzato in applicazioni ottiche grazie alle sue porprietà, in quanto il diamante può essere utilizzato per realizzare fotorilevatori e laser UV [23].

Vista l'elevata mobilità dei portatori all'interno del diamante, si può utilizzare questo materiale per la realizzazione di particolari dispositivi che fungono da sensori. Tali dispositivi sono dei transistor a cui è stato rimosso l'elettrodo di gate, e nel vuoto lasciato viene inserita la sostanza da analizzare. Un elettrodo di riferimento viene inserito nella soluzione, e la quantità monitorata è la corrente che scorre tra drain e source prodotta dalla soluzione. Quindi questa tecnica permette di rilevare quali elementi sono presenti nella soluzione posta in sostituzione dell'elettrodo di gate.

Capitolo 2

Dispositivi MESFET in diamante

In questo capitolo viene fornita una panoramica sul funzionamento dei ME-SFET, sul meccanismo di crescita dei dispositivi in esame e sulle loro regioni di funzionamento.

2.1 MESFET

Il MESFET (MEtal-Semiconductor Field-Effect Transistor) è nato negli anni '60 come evoluzione del MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) dall'esigenza di impiegare materiali diversi dal silicio nella produzione di transistor.

La scelta del diamante come materiale da utilizzare permette di raggiungere valori del campo elettrico di breakdown elevati grazie all'elevato valore di energy gap. In applicazioni di potenza, c'è la necessità di un alto valore di corrente, che è possibile raggiungere grazie all'alta concentrazione di portatori, dalla loro mobilità, μ , per valori bassi di campo elettrico, e dalla velocità di saturazione v_{sat} per valori alti del campo elettrico [22]. Per cristalli singoli di diamante cresciuti con la tecnica CVD la mobilità dei portatori è estremamente elevata, infatti, per gli elettroni $\mu = 4500 \ cm^2/Vs$, mentre per le lacune $\mu = 3800 \ cm^2/Vs$ [22]. La velocità di saturazione per gli elettroni è $v_{sat} = 1.5x10^7 \ cm/s$, mentre per le lacune si ha $v_{sat} = 1.1x10^7 \ cm/s$. Queste proprietà portano ad avere un alto livello di potenza anche in applicazioni per radiofrequenza (RF). Per l'utilizzo del diamante in applicazioni di potenza, si riesce ad avere una frequenza di transizione (f_T) elevata, si possono ottenere frequenze di transizione di circa $f_T = 45 \ GHz$. La frequenza di

transizione è definita come la fequenza alla quale il guadagno del dispositivo diventa unitario. [22].

2.2 Struttura del MESFET

La mancanza di un ossido stabile e la presenza di numerosi difetti dovuti alla scarsa qualità del substrato di partenza si sono rivelati problemi non banali nella riproduzione della struttura MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) per dispositivi basati sul diamante. L'innovazione è consistita nell'utilizzo di una barriera Schottky come contatto per il gate.

Questa struttura consiste nel depositare una metallizzazione (alluminio) direttamente sullo strato attivo del dispositivo. La tensione applicata al gate cambia l'ampiezza della regione di svuotamento causando una variazione della corrente tra source e drain. Dal momento che la mobilità degli elettroni e delle lacune è molto simile, si possono realizzare MESFET sia p che n, andando a terminare la superfice del diamante rispettivamente con idrogeno e ossigeno.

Nei MESFET di tipo n per tensioni di gate negative il canale conduttivo tra drain e source non è formato e quindi non ci può essere passaggio di carica. Per valori di tensioni di gate superiori ad un certo valore chiamato tensione di soglia (v_{th}) , positiva, il canale conduttivo è formato e dipendentemente dalle tensioni applicate agli altri due terminali si ha un passaggio di corrente, il cui valore dipende dalla differenza di tensione applicata tra drain e source. Nel caso in cui il MESFET sia di tipo p, per tensioni di gate positive, il canale conduttivo non è ancora formato e quindi non ci può essere passaggio. Per valori di tensione di gate inferiori al valore della tensione di soglia, negativa, il canale conduttivo è formato e dipendentemente dalle tensioni applicate agli altri due terminali si ha un passaggio di corrente, il cui valore dipende dalla differenza di tensione applicata tra drain e source.

Per i dispositivi in esame si ha che la superfice del diamante è stata terminata con atomi di idrogeno e quindi i dispositivi sono di tipo p. Nei dispositivi in esame, per fare in modo che il canale conduttivo sia formato, si deve avere che la tensione di gate assuma valori più negativi della tensione di soglia che è negativa.

La corrente che scorre attraverso il MESFET viene espressa come:

$$I_{DS} = q\mu n \frac{W}{L} a \left\{ V_{DS} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\epsilon}{qn}} \left[(\phi_i - V_{GS} + V_{DS})^{1.5} - (\phi_i - V_{GS})^{1.5} \right] \right\}$$
(2.1)

dove q è la carica elettronica, per dispositivi di tipo p va considerato -q, quindi la corrente è una corrente negativa, W, L, a sono rispettivamente larghezza, lunghezza e spessore del canale, n è la densità per cm^2 di portatori liberi di muoversi nel materiale che danno origine al canale, ϵ è la costante dielettrica del materiale, ϕ_i è il potenziale intrinseco del materiale in cui si forma il canale, infine, μ è la mobilità degli elettroni/lacune. Dall'equazione 2.1 si può vedere che la corrente dipende essenzialmente da due variabili: V_{DS} e V_{GS} . Per le misure svolte in questo lavoro si considera sempre la tensione al source nulla, cioè $V_S = 0$, quindi la tensione V_{DS} che indica la tensione di drain riferita alla tensione di source, nel seguito viene definita solo come V_d , la stessa cosa viene fatta anche per la tensione V_{GS} , che nel seguito viene chiamata solamente V_g . A seconda di che grandezza si assume come variabile indipendente si parlerà di misura delle caratteristiche di uscita $(I_d - V_d)$ e la variabile indipendente è la tensione al drain V_D , o di transcaratteristica (oppure $I_d - V_q$) se la variabile indipendente è V_q , da quest'ultima misura è possibile ricavare l'andamento della transconduttanza (g_m) . Nei dispositivi attivi la transconduttanza è il rapporto tra la variazione della corrente di uscita e la variazione della tensione di ingresso. Nel modello a piccoli segnali del dispositivo, tale valore indica il guadagno del dispositivo tra la tensione in ingresso e la corrente di uscita.



Figura 2.1: Meccanismo di funzionamento dei MESFET

Nella figura 2.1 è riportato il miccanismo di funzionamento del MESFET descritto in precedenza. Infatti si vede che aumentando la tensione al gate aumenta la regione di svuotamento sotto al gate in quanto una tensione positiva tende a respingere le lacune all'interno del bulk. Aumentando troppo la zona di svuotamento si impedisce la creazione del canale conduttivo e quindi impedisce il passaggio di corrente. Portando la tensione al gate negativa si va a ridurre le dimensioni della regione di svuotamento, questo rende possibile avvicinare le lacune all'interfaccia metallo-diamante e quindi rende possibile la formazione del canale e il passaggio di corrente tra drain e source. Il valore della tensione di gate che permette la formazione del canale conduttivo è chiamata tensione di soglia. Continuamndo ad aumentare in modulo la tensione di gate la regione di svuotamento continua a ridursi e quindi aumenta la corrente che è in grado di circolare nel dispositivo. Lo svantaggio del MESFET è che non si può aumentare troppo la tensione di gate perchè altrimenti si polarizza in diretta il diodo Schottky, che si viene a formare nella giunzione di gate, e il dispositivo non funziona più come ampliicatore.

2.3 Prestazioni dei MESFET

La tecnologia MESFET è attualmente tra le più diffuse nelle applicazioni ad alta velocità, ed è relativamente semplice ed economica per quanto riguarda la realizzazione.

Rispetto al MOSFET, il vantaggio di un MESFET consiste nella maggior mobilità dei portatori nel canale. Dal momento che i portatori localizzati nella regione di inversione di un MOSFET risentono dello scattering prodotto dagli atomi del reticolo, la loro mobilità è molto ridotta, circa della metà, rispetto alla mobilità che i portatori avrebbero se si muovessero nel bulk del materiale. Nei MESFET la zona di svuotamento separa i portatori dalla superfice per cui la loro mobilità è simile a quella del bulk. La maggiore mobilità implica una corrente, transconduttanza e frequenza di transito maggiori.

La presenza di un contatto Schottky nella stuttura del MESFET, per realizzare il contatto gate, costituisce uno svantaggio: la polarizzazione del gate è limitata alla tensione di accensione del diodo, che costituisce dunque un vincolo stringente per la tensione di soglia del dispositivo.

Per applicazioni a basso rumore, alta potenza e alta frequenza, il MESFET è da ritenersi in generale una scelta molto diffusa anche se trovano sempre più spazio nuove tecnologie quali HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) e HEMT (High Electron Mobility Transistor).

2.4 Struttura dei MESFET in esame

Nella figura 2.2 è riportata un vista dall'alto dei dispositivi in esame e una figura della sezione dello stesso dispositivo.



Figura 2.2: a: vista dall'alto del dispositivo, b: sezione del dispositivo [22]

Dalla parte a della figura, si può riconoscere la struttura RF con il gate in un lato del dispositivo e il drain nel lato opposto, mentre il source circonda la struttura formata da gate e drain. Nella parte \mathbf{b} della figura, si vede la sezione del dispositivo, dove alla base di tutto c'è il substrato di diamante cresciuto ad alta temperatura e ad alta pressione, al di sopra di questo substrato, si trova il diamante cresciuto con la tecnica CVD, la cui superfice è stata ricoperta da uno strato di atomi di idrogeno che vanno a formare il canale di lacune all'interno del diamante cresciuto con la tecnica CVD. Al di sopra dello strato di idrogeno sono piazzati i contatti, all'esterno ci sono i due contatti di source e al centro c'è il contatto di drain. Tra i contatti di source e drain ci sono i due finger di gate che partono dalla piazzola nella parte bassa della figura \mathbf{a} e arrivano fino alla piazzola del contatto di drain nella parte alta della stessa figura. La particolare forma a T dei due finger di gate riduce la resistenza del contatto e aumenta la frequenza di transito del dispositivo in quanto questa struttura va a mitigare i picchi di campo elettrico che possono intensificare i fenomeni di intrappolamento di carica.. Nella figura 2.3 vengono riportati i passaggi per la fabbricazione dei dispositivi e la deposizione dei contatti.



Figura 2.3: Processo di fabbricazione dei dispositivi e della deposizione dei contatti [22]

Nella figura **a** si vedono i primi due step, il primo è la crescita epitassiale di uno strato di diamante non drogato sopra ad un substrato di diamante, il secondo step è la copertura dello strato appena cresciuto con l'idrogeno, responsabile della formazione del canale di lacune all'interno dello strato di diamante cresciuto con la tecnica CVD, mentre il substrato è stato cresciuto con la tecnica HPHT.

Nella figura **b** si vedono altri due step, il primo è la vaporizzazione di uno strato di oro per la realizzazione dei contatti di source e drain, il secondo passo mostrato è quello della deposizione di un materiale resistente per preservare lo strato di oro dove si vogliono realizzare i contatti e invece lasciare scoperta la parte di oro in eccesso.

Nella figura \mathbf{c} viene mostrato il passo di rimozione dell'oro in eccesso, tale operazione può essere svolta mediante attacco acido che va a rimuovere la parte di oro non coperta da materiale resistente a tale attacco, oppure, la rimozione può avvenire tramite un attacco con un plasma di ossigeno. Una volta rimossa la parte di oro in eccesso, si procede andando a rimuovere il materiale resistente che copriva la parte di oro da mantenere.

Nella figura **d** vengono riportati i passaggi per la preparazione alla deposizione del contatto di gate. Prima di procedere alla deposizione dello strato di alluminio, si procede a stendere sopra alla struttura realizzata, uno strato di materiale resistente ad un attacco acido, in modo tale da lasciare aperta una finestra sopra il contatto d'oro in modo tale che, mediante un attacco acido, si vada a rimuovere l'oro e a dividere in due parti lo strato di oro depositato nel passo precedente, in modo tale da aprire lo spazio per la deposizione del finger di gate.

Nella figura **e** si vede il processo di deposizione del contatto di gate in alluminio che, grazie alla struttura realizzata nel passo precedente con la deposizione dello strato resistente ad un attacco con un fascio di elettroni, forma una T in modo tale da ridurre la resestenza del contatto e quindi aumenta la frequenza di transito del dispositivo.

Nella figura \mathbf{f} viene mostrato il dispositivo finale dopo che sono stati eseguiti gli ultimi passaggi per la rimozione dell'alluminio in eccesso depositato per la realizzazione del contatto di gate, e la rimozione dello strato di materiale resistente depositato in precedenza per la realizzazione della struttura del gate.

Una volta ultimati tutti i passaggi per la realizzazione dei dispositivi, si procede a passare il wafer in un reattore al cui interno l'atmosfera è di ossigeno in modo tale che gli atomi di ossigeno si leghino alla superfice ancora esposta del diamante, in modo tale da isolare elettricamente i dispositivi, in quanto l'ossigeno appena depositiato si comporta come un isolante.

2.5 Diagramma a bande

Per comprendere il meccanismo di funzionamento dei dispositivi in esame, si passa a studiare il diagramma a bande della struttura realizzata. I di-

spositivi presentano la terminazione della superfice con idrogeno, quindi i dispositivi sono di tipo p e quindi presentano una tensione di soglia negativa. Per $V_{qs} > 0$ il canale non è ancora formato in quanto la tensione positiva applicata al gate fa piegare le bande in modo tale da allontanare le lacune dall'interfaccia tra diamante e alluminio e quindi non si forma il canale conduttivo e quindi non ci può essere passaggio di carica tra drain e source e questo non permette il passaggio di corrente nel dispositivo. Portando la tensione al gate negativa, ma con valori vicini allo 0, si entra in una zona chiamata zona di bande piatte per poi passare nella zona chiamata zona di accumulazione, in questa zona di funzionamento la tensione applicata al gate richiama le lacune nella zona di interfaccia tra diamante e alluminio, rendendo possibile la formazione del canale. Essendo la tensione piccola, i portatori richiamati non sono molti e quindi la carica che può scorrere tra source e drain non è elevata, questo comporta che la corrente che può scorrere nel dispositivo in questa condizione di funzionamento non è elevata. Applicando una tensione al gate negativa e con valori in modulo elevati, si raggiunge la zona di inversione e di forte inversione, in base al valore della tensione applicata. In questa regione di funzionamento l'elevato valore della tensione al gate richiama molte lacune nella zona di interfaccia tra diamante e alluminio formando il canale. Attirando un elevato numero di portatori a formare il canale, la quantità di carica che può passare tra source e drain è elevata, questo implica che nel dispositivo la corrente che può circolare è elevata.

Nelle immagini della figura 2.4 è riportato il diagramma a bande per un mesfet di tipo n. Dall'immagine (a)si vede come si modifivano le bande quando al dispositivo è applicata una tensione positiva al gate. Dalla figura si vede che nella zona attiva del materiale si viene a creare un gas di elettroni che vanno a formare il canale conduttivo. Aumentando la tensione di gate si attirano più elettroni nel canale permettendo il passaggio di corrente tra drain e source. Nell'immagine (b) si vede come si modificano le bande qundo al terminale di gate viene imosta una tensione negativa, infatti si vede che il gas di elettroni che andava a formare il canale, in questa condizione, è andato all'interno del bulk impedendo quindi il passaggio di corrente tra drain e source. I dispositivi analizzati in questo lavoro sono MESFET di tipo p, quindi per quanto riguarda il comportamento delle bande, si ha che il canale di lacune si viene a creare quando la tensione imposta al gate è più negativa del valore della tensione di soglia, quindi il passaggio di corrente è possibile solo se la tensione al gate è negativa. Se al gate viene imposta una tenione positiva, il canale di lacune si sposta all'interno del bulk impedendo il passaggio della corrente.



Figura 2.4: Diagramma a bande del Mesfet [16]

2.6 Difetti

Nella fase di crescita del materiale che compone il substrato e la zona attiva del transistor vengono creati anche dei difetti. Nella figura 2.5 sono riportati alcuni esempi di difetti che possono essere generati con le due tecniche descritte nel precedente capitolo.

Nella figura si vedono alcuni dei principali difetti che possono crearsi durante la crescita del materiale. Le vacanze reticolari consistono in posizioni atomiche vacanti del reticolo cristallino. Si formano in seguito a uno spostamento degli atomi, avvenuto grazie all'energia ricevuta dall'ambiente sotto forma di agitazione termica, oppure contestualmente alla deformazione plastica subita dal corpo. Solitamente le vacanze si formano in prossimità della superficie del materiale, perchè qui gli atomi sono meno legati rispetto a quelli più interni, perciò possono liberarsi più facilmente dai rispettivi siti reticolari. Per quanto riguarda gli atomi sostituzionali, questi sono atomi differenti da quelli presenti nella maggior parte del cristallo e vanno a rimpiazzare questi ultimi in alcuni siti reticolari; ciò può avvenire solo se il raggio atomico dell'elemento diverso è simile a quello degli atomi che, essendo presenti in maggioranza, determinano la struttura del reticolo. La soluzio-



Figura 2.5: (a) Impurità interstiziale, (b) Deformazione del lato, (c) Atomo del reticolo in posizione interstiziale, (d) Vacanza, (e) Reticolo cristallino di impurità, (f) Anello di dislocazioni come vacanze, (g) Anello di dislocazioni di tipo interstiziale, (h) Impurità in posizione sostituzionale ad un atomo del reticolo

ne solida sostituzionale che si ottiene può essere di due tipi: ordinata, se la temperatura è al di sotto di un valore critico, i i due elementi hanno un rapporto stechiometrico preciso e le forze intermolecolari tra atomi diversi sono più forti di quelle tra atomi uguali; casuale, se manca almeno una delle precedenti condizioni. In base alle dimensioni dell'atomo sostituzionale si può avere una compressione o una dilatazione dei legami chimici del reticolo nella zona dove è inserita l'impurità. Gli atomi interstiziali sono atomi dal raggio nettamente più piccolo rispetto agli atomi del reticolo cristallino; essi si posizionano nelle lacune reticolari, cioè nelle cavità di forma ottaedrica o tetraedrica presenti nel reticolo tridimensionale, la cui grandezza e il cui numero per cella unitaria dipendono dal tipo preciso di reticolo cristallino. Anche questi atomi provocano una distorsione del reticolo, più precisamente respingono gli atomi circostanti sottoponendoli ad uno sforzo di compressione in quanto occupano una posizione normalmente lasciata libera.

I difetti descritti in precedenza vengono chimamati difetti puntuali, i difetti descritti in seguito vengono chiamati difetti in linea. Di questa categoria fanno parte le dislocazioni a spigolo e le displocazioni a vite. Per quanto riguarda le dislocazioni a spigolo si formano quando una porzione del reticolo cristallino contiene una linea atomica aggiuntiva rispetto all'altra; la presenza di questa linea aggiuntiva provoca, nell'intorno della linea di dislocazione, un puro sforzo normale. Questo genere di difetto può muoversi all'interno del reticolo cristallino in due modi: scorrimento orizzontale con cui la dislocazione, spostandosi lungo il piano di scorrimento, causa una traslazione relativa tra le due porzioni di reticolo pari a una posizione atomica; scorrimento verticale quando la dislocazione si muove perpendicolarmente al piano usuale di scorrimento ritirandosi o avanzando mediamente di una posizione atomica alla volta. Le dislocazioni a vite si ottengono quando una parte del cristallo è traslata di un passo atomico rispetto a un'altra; un tale difetto genera un puto sforzo di taglio nell'intorno della dislocazione. Un ultimo esempio di difetti è dato dal difetto di impilaggio, tale difetto si forma quando l'impilazione di due strati atomici successivi è alterata dall'inserimento di una dislocazione unitaria o da dislocazioni parziali.

All'aumentare della temperatura si ha che il numero di difetti aumenta in quanto l'incremento della temperatura fornisce energia agli atomi che formanoil reticolo cristallino rendendo possibile la rottura di alcuni legami, andando così a formare delle vacanze, si va ad aumentare la distanza tra due atomi adiacenti permettendo l'inserimento di una impurità nel vuoto creato dall'allontanamento degli atomi, dando vita ad un difetto interstiziale.

I difetti creati nel materiale danno luogo ad alcuni stati all'inerno del diagramma a bande chiamati stati trappola.Tali stati all'interno del diagramma a bande sono resposnsabili dei fenomeni di intrappolamento e detrappolamento di carica analizzati con alcune misure nei due capitoli seguenti. Il fenomeno dell'intrappolamento di carica prende il nome di effetto di Poole-Frenkel, tale effetto è descritto dall'immagine 2.6.



Figura 2.6: Diagramma a bande dell'effetto Poole-Frenkel

Dalla figura 2.6 si vede che gli stati trappola vanno a creare dei livelli all'interno dell'energy gap andando a modificare le bande del dispositivo, in particolare si vede che quando il dispositivo non è alimentato il diagramma a bande è rappresentato dalla curva tratteggiata. Andando a polarizzare il dispositivo si vanno a piegare le bande, e il diagramma diventa la curva rossa. Quando un elettrone è intrappolato nello stato trappola si vede che per uscire dalla condizione di intrappolamento l'energia da fornire al portatore è minore nel caso in cui il dispositivo è alimentato. L'energia da fornire ai portatori per superare la barriera viene chiamata energia di attivazione e identifica la differenza in energia tra l'energia dello stato trappola e il punto più alto raggiunto dalla banda di conduzione. Come detto in precedenza l'aumento della temperatura prooca l'aumento dei difetti e quindi l'aumento degli stati trappola, un altro meccansmo che provoca il loro aumento è lo stress elettrico del campione che va a danneggiare il materiale generando nuovi difetti che contribuiscono all'aumentare l numero di difetti e quindi di stati trappola. L'eccessivo aumento di difetti compromette l'affidabilità del dispostivo e lo porta alla rottura. Nei seguenti capitoli vengono eseguite delle misure di stress in diverse condizioni di funzionamento del dispositivo che mostrano l'aumento dei difetti.

2.7 Effetti di canale corto

I dispositivi analizzati in questo lavoro sono transistor con una lunghezza di canale piccola, $L_{gate} = 2.5 \mu m$ per il primo set di campioni analizzati e $L_{gate} = 1 \mu m$ per il secondo set di campioni. Per dispositivi con la lunghezza del canale conduttivo così piccola si innescano dei meccanismi chiamati effetti di canale corto. Uno di questi effetti e chiamato Drain-Induced Barrier Lowering, DIBL. Il meccanismo alla base di questo effetto è illustrato nella figura 2.7.

Nella figura 2.7 è riportato il comportamento di un transistor a canale lungo e di uno a canale corto al variare della tensione di drain. Andando ad analizare il comportamento di un dispositivo a canale lungo, curva tratteggiata, si vede che in condizioni di alimentazione nulla la barriera energetica che si vede al suorce non viene modificata all'aumentare della tensione di drain. Andando a vedere il comportamento del dispositivo a canale corto si vede che andando ad aumentare la tensione di drain si ha una diminuzione dell'altezza di barriera al source, questo implica che per gli elettroni è più facile superare la barriera e arrivare al terminale di drain. Questo comporta un aumento della corrente di drain misurata. Nei capitoli successivi vengono eseguite del-



Figura 2.7: Drain-Induced Barrier Lowering

le misure chiamate step-stress, tra queste in quelle eseguite in OFF-State si vede che andando ad aumentare la tensione di drain aumenta anche la corrente di drain misurata, questa variazione è dovuto all'abbassamento della barriera di source.

Capitolo 3

Primo set di campioni

In questo capitolo verranno forniti dettagli sul primo set di campioni analizzati, sulle misure effettuate e sulle procedure adotatte per eseguire le misure.

3.1 Campioni

Nella figura 3.1 sono riportati i dispositivi analizzati.

Da questa figura, oltre alla disposizione dei campioni, si può vedere anche la convenzione utilizzata per identificare ogni singolo dispositivo. Dalla figura 3.1 si può vedere come sono effettivamente realizzati i campioni analizzati, infatti, si può vedere il contatto grigio in alluminio che è il contatto di gate, mentre gli altri contatti sono in oro e si può vedere che il contatto centrale è il contatto di drain, mentre i quattro contatti esterni sono i contatti di source. I dispositivi presenti in questo wafer presentano tutti la stessa lunghezza del canale di gate, $L_{qate} = 2.5 \mu m$, mentre per quanto riguarda la larghezza, ci sono tre valori diversi, infatti ci sono dispositivi con $W = 50 \mu m$, dispositivi $\cos W = 100 \mu m$ e dispositivi $\cos W = 200 \mu m$. Nella parte bassa della figura 3.1 sono presenti anche tre diodi, che per questo elaborato, non sono stati considerati. Nella figura si possono vedere alcuni dispositivi contrassegnati con una "x", questo sta ad indicare che tali dispositivi non sono funzionanti. Per contattare i dispositivi per imporre le tensioni e leggere le correnti, si utilizza una coppia di punte con layout RF. Per i dispositivi in esame le punte utilizzate sono punte Picoprobe RF GSG 150 LP riportate nella figura 3.2. Nell'immagine (a), si vede la parte che va a contattare il dispositivo e inoltre si può vedere il punto in cui la punta va a collegarsi al sistema di misura. Per collegare la punta allo strumento che impone la tensione e legge la corrente, si procede andando a collegare nella parte filettata della punta



Figura 3.1: Schema wafer 1 con in evidenza la convenzione unilizzata per identificare i dispositivi

un adattatore da SMA a BNC, poi un cavo coassiale collega un adattatore da biassiale a triassiale per poi collegarsi allo strumento. Nell'immagine (b) si vede un ingrandimento della zona delle punte, dove si può vedere che le punte sono tre. Come dice il nome GSG (Ground-Signal-Ground), le due punte esterne sono collegate a massa, mentre la punta centrale è la punta che impone effettivamente la tensione desiderata e va a leggere la corrente che circola nel dispositivo.



Figura 3.2: (a) : punta RF GSG LP; (b) : zoom delle punte

3.2 Caratterizzazione DC

Al fine di avere una conoscenza più completa possibile dei dispositivi in esame si procede ad una caratterizzazione DC preliminare dei transistor, testando la dipendenza della corrente di drain imponendo in un caso la tensione al gate e variando la tensione al drain, in questo caso si parla di misura delle caratteristiche di uscita, $I_d - V_d$. Nell'altro caso, si impone la tensione al drain e si va a variare la tensione al gate, in questo caso si parla di $I_d - V_g$ o di transcaratteristica.

Un'altra misura che fa parte della caratterizzazione DC è la misura che va a vedere il comportamento dei diodi che si vengono a formare nelle giunzioni del dispositivo, in particolare si va a vedere il comportamento del diodo gatesource e del parallelo dei diodi gate-source e gate-drain. Per effettuare queste misure si fa uno sweep della tensione al gate tra $V_g = 4.5V \text{ e } V_g = -4.5V$, per il primo diodo si impone la tensione al gate, mantenendo il source a massa e lasciando flottante il terminale di drain. Per la misura del secondo diodo si impone la tensione al gate e si collegano a massa sia il terminale di source che quello di drain.

Per effettuare la caratterizzaizone DC il wafer viene posto su una piastra di supporto, detta *chuck*, all'interno di una probe station; quest'ultima funge da gabbia di Faraday schermando il campione da campi elettromagnetici ambientali e dalla luce esterna.

Si procede quindi a contattare il dispositivo che si vuole misurare utilizzan-

do due micromanipolatori e una coppia di punte RF collegate, tramite cavi biassiali BNC, ad un Semiconductor Parameter Analyzer (SPA), l'Agilent E5263A. Il parameter analyzer supporta due canali di SMU (Source/Monitor Units) per le misure di tensione e corrente; si usa la High Speed High Power SMU per imporre la tensione e misurare la corrente di drain e la High Speed Medium Power SMU per imporre la tensione e misurare la corrente di gate. L'agilent E5263A viene quindi connesso tramite un connettore GPIB-USB ad un computer dove, attraverso software sviluppati in ambiente LabView, si pilota lo strumento in modo tale da ottenere le caratteristiche statiche del dispositivo (caratteristiche di uscita, $I_d - V_d$, transcaratteristica $I_d - V_g$ e diodi). Tale setup è lo stesso per tutte le misure, con la sola differenza che sta nel programma LabView utilizzato che è diverso a seconda del tipo di misura che si vuole effettuare.



Figura 3.3: (a) : Caratteristiche di uscita $(I_d - V_d)$; (b) : Transcaratteristica $(I_d - V_g)$

Nella figura 3.3 sono riportate le caratteristiche DC per un campione presente nel wafer. Dall'immagine (a) si vede la caratteristica di uscita, cioè si va a vedere la dipendenza della corrente di drain imponendo una tensione costante al gate ed andando a variare la tensione al drain. La tensione al drain varia tra 0V = -25V. Lo sweep di tensione al drain viene ripetuto per diversi valori della tensione al gate riportati nella legenda del grafico. Da questo grafico, si possono riconoscere due zone di funzionamento del dispositivo. La prima zona è quella per valori della tensione di drain in modulo inferiori a 5V in cui il dispositivo è nella zona di triodo o zona resistiva. Il dispositivo in questa zona si comporta come una resistenza, cioè la corrente di drain
cresce in modo lineare con la tensione applicata al drain. La seconda zona di funzionamento è riconoscibile per valori di tensioni di drain superiori a 5V in modulo, questa zona di funzionamento si chiama zona di saturazione in cui le curve sono piatte e la corrente di drain non mostra particolari dipendenze dalla tensione di drain.

Dall'immagine (b) si vede il grafico della $I_d - V_g$, cioè si va a vedere la dipendenza della corrente di drain imponendo una tensione costante al drain ed andando a variare la tensione al gate. La tensione al gate varia tra 1V e -4.5V. Lo sweep di tensione al gate viene ripetuto per diversi valori della tensione di drain riportati nella legenda del grafico. Da questo grafico si può calcolare la tensione di soglia del dispositivo andando a fissare un valore della corrente di drain, e la tensione di soglia (V_{th}) è il valore della tensione di gate alla quale la corrente di drain è uguale al valore della corrente fissato. Dal grafico si può riconoscere il meccanismo di funzionamento del dispositivo, per valori di tensione compresi tra 1V e -0.5V, la corrente che circola nel dispositivo è circa 0A, questo perchè il canale conduttivo non è ancora formato, quando poi la tensione al gate raggiunge il valore della tensione di soglia, la corrente di drain aumenta. Più elevato è il valore della tensione applicata al drain, maggiore è la corrente che riesce a scorrere nel dispositivo, perchè il campo elettrico che si forma tra source e drain aumenta e quindi aumenta anche la velocità dei portatori e quindi nello stesso intervallo di tempo la carica che passa nel dispositivo è maggiore, e questo implica un aumento della corrente di drain del dispositivo quando lavora in zona lineare.



Figura 3.4: (a) : Diodo gate-source; (b) : Parallelo Diodo gate-source gate-drain

Nella figura 3.4 è riportato l'andamento dei diodi di un campione. Per entrambi i grafici si vede che finchè la tensione al gate è tale da mantenere il dispositivo acceso, la corrente che scorre nei diodi assume valori superiori rispetto ai valori assunti quando la tensione di gate è tale da mantenere spento il dispositivo. Avvicinandosi al valore della tensione di soglia con la tensione imposta al gate, si vede che la corrente diminuisce avvicinandosi alla soglia da valori più negativi, invece, aumenta portando la tensione di gate verso valori positivi.

3.3 $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide

Per analizzare i fenomeni di intrappolamento di carica lenti si effettuano delle $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide. Queste misure consistono nel mantenere una condizione di intrappolamento (filling) di carica nella prima parte della misura, e una condizione di detrappolamento (recovery) nella seconda parte. Durante l'intera durata della misura, vengono effettuate delle caratterizzazioni veloci del dispositivo così da monitorare l'andamento della caratteristica $I_d - V_g$ dalla quale si ricava l'andamento della tensione di soglia e della caratteristica di uscita dalla quale si ricava l'andamento della resistenza R_{on} senza andare ad alterare lo stato di intrappolamento di carica del dispositivo.



Figura 3.5: Tempistiche della misura $I_d - V_d \in I_d - V_g$ campionate rapide

Nella figura 3.5 è schematizzato il funzionamento della misura, nell'immagine si nota una prima fase di filling in cui il dispositivo è tenuto in una condizione di interappolamento e all'interno di questa fase viene eseguita una caratterizzazione veloce del dispositivo senza andare a modificare la condizione di intrappolamento raggiunta dal dispositivo. Subito dopo aver terminato la fase di filling, inizia la fase di recovery o detrappolamento dove la carica intrappolata nel dispositivo viene emessa, ed anche durante questa fase viene fatta una caratterizzazione veloce per vedere come evolve la rimozione della carica dal dispositivo. La durata temporale delle due fasi è uguale e pari a 100s. Visto che la caratterizzazione deve essere veloce per non intaccare lo stato di intrappolamento o detrappolamento, la caratterizzazione non viene effettuata a tutti i valori riportati nel paragrafo 3.2, ma la caratteristica di uscita viene valutata solamente per $V_g = -1.6V$, mentre per quanto riguarda la $I_d - V_g$, la misura viene effettuata solo per Vd = -9V.

3.4 $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide al variare della temperatura

Per andare a verificare la presenza di eventuali stati trappola responsabili delle variazioni della resistenza e della tensione di soglia riscontrati negli step stress all'interno del diamante e per vedere la loro energia di attivazione, si procede andando ad eseguire le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide al variare della temperatura. Per cambiare la temperatura del wafer, si fa uso di una probe station con un thermal chuck collegato ad un controllore di temperatura TC 1000 Temperature Controller che è in grado di impostare la temperatura desiderata e mantenerla stabile per il tempo necessaro per effettuare la misura. Le temperature impostate per la misura, sono $33.5^{\circ}C$, minima temperatura che è possibile raggiungere stabilmente con il chuck, $40^{\circ}C$, $50^{\circ}C$, $60^{\circ}C$, $70^{\circ}C$.

Prima di eseguire le misure, si procede andando ad effettuare una caratterizzazione DC con il chuck portato alla temperatura stabile minima, per verificarne la performance il linea con il comportamento medio del wafer. Finita la caratterizzazione DC si procede ad eseguire le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide alle temperature sopra indicate. Finite le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide a tutte le temperature, si riporta il chuck alla temperatura iniziale e si fa una nuova caratterizzazione DC completa per andare a vedere che la caratterizzazione effettuata al variare della temperatura non abbia influenzato le caratteristiche del campione.

Per quanto riguarda le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide, la misura di riferimento si ottiene impostando ($V_g = 0$; $V_d = 0$) sia per la fase di filling che per la fase di recovery. Oltre alla misura che viene utilizzata come riferimento per le variazioni dei parametri ottenuti con le successive misure, altre $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide vengono effettuate in divese condizioni, queste condizioni sono tre misure con il dispositivo in ON, altre tre misure con il dispositivo in ON ma con una tensione di gate in modulo inferiore rispetto al caso precedente, tre misure in SEMI-ON, infine, vengono eseguite tre misure con il dispositivo in OFF. In particolare in seguito vengono elencate le coppie di tensione di gate e tensione di drain, nell'ordine in cui sono state eseguite: ON-State (V_g, V_d) = (-4, -5), (-4, -10), (-4, -15), ON-State (V_g, V_d) = (-1, -5), (-1, -10), (-1, -15), SEMI-ON-State (V_g, V_d) = (0, -5), (0, -10),

(0, -15), OFF-State $(V_g, V_d) = (1, -5), (1, -10), (1, -15).$

Questa misura viene effettuata sul MESFET C6 con $W = 50 \mu m$, per la localizzazione del dispositivo, anche in questo caso si fa riferimento alla figura 3.1.

Una volta ottenuti i grafici delle caratteristiche di uscita e delle $I_d - V_g$, si procede al calcolo della Ron a partire dai grafici delle $I_d - V_d$, mentre dalle $I_d - V_g$, si procede al calcolo della tensione di soglia. Una volta ottenuti questi valori si procede a graficare le Ron e la Vth al variare della temperatura, un grafico per ogni tensione di filling e un grafico per ogni recovery associato ad una tensione di filling. Una volta ottenuti questi grafici, si procede ad eseguire un fitting esponenziale per ricavare la costante di tempo, τ . Una volta ottenute le costanti di tempo per ogni tensione di filling e per temperatura, si procede a realizzare il grafico di Arrhenius. Una volta ottenuti i vari grafici di Arrhenius, si procede ad eseguire un fitting lineare per andare a ricavare la pendenza della retta ottenuta con il fitting. I valori di pendenza ottenuti indicano l'energia di attivazione degli stati trappola all'interno del diamante responsabili della variazione della Ron e della Vth.



Figura 3.6: R_{on} al variare della temperatura su C6 con $W = 50 \mu m$

Dal grafico della figura 3.6 si vede che l'andamento della resistenza è un andamento esponenziale e riportato nello stesso grafico c'è anche il fitting esponenziale eseguito con *stretched exponential*. Una volta eseguito il fitting, si estrae il valore della costante di tempo per le quattro diverse temperature. Ottenute le costanti di tempo, si procede a realizzare il grafico di Arrhenius.



Figura 3.7: Grafico di Arrhenius su C6 con $W = 50 \mu m$

Nella figura 3.7 si vede il grafico di Arrhenius ottenuto a partire dalle costanti di tempo calcolate della figura 3.6. Dal grafico si vede anche l'interpolazione lineare eseguita, da tale interpolazione si estrae la pendenza della retta, tale pendenza indica l'energia di attivazione degli stati trappola presenti nel diamante. Dal grafico, si vede che l'energia di attivazione ottenuta dalla misura è di $Ea \cong 0.3 eV$.

La buona qualità del fitting con il modello stretched exponential indica che i livelli profondi sono causati da difetti estesi o da minibande di energia. Tali difetti sono quindi responsabili delle variazioni di R_{on} e dello shift della tensione di soglia all'avanzare dello stress.

Andando ad eseguire lo stesso procedimetno appena illustrato per tutte le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide si ottengono i grafici riportati nella seguente figura.

Nella parte alta della figura 3.8 è riportata l'energia di attivazione ottenuta dalla tensione di soglia che è stata calcolata a due diversi valori della corrente di drain, mentre nella parte bassa è riportata l'energia di attivazione calcolata dalle curve della resistenza. Dai grafici discussi in precedenza si è trovato che l'energia di attivazione è $Ea \cong 0.3eV$. Dal grafico che mostra le energie calcolate dalla tensione di soglia a $I_d = 500\mu A$ si vede che a parte le energie con $V_g = -4V$, le altre sono tutte nell'intorno di 0.3eV. Per quanto



Figura 3.8: Energia di attivazione su C6 con $W = 50 \mu m$

riguarda il grafico delle energie ottenuto dalle V_{th} calcolata con $I_d = 500 \mu A$ si vede che c'è una mggiore dispersione dei valori di energia ma comunque per i valori di energia ottenuti con $V_g = 0V$ e $V_g = -1V$ rimangono in un intorno di 0.3eV. Dal grafico delle energie ottenute delle curve della R_{on} , si vede che a parte un punto ottenuto dalle curve con $V_g = -4V$, tutti gli atri punti sono concentrati in un intorno di 0.23eV, valore leggermente inferiore rispetto a quello trovato in precedenza.

Nei grafici (a) e (b) riportati nella figura 3.9 è riportata l'ampiezza dell'esponenziale ricavato dal fitting dei grafici ottenuti dalla tensione di soglia alla temperatura di 40°C.Nella parte bassa della figura è riportato il grafico dell'ampiezza dell'esponenziale ricavato dai grafici della R_{on} sempre alla



Figura 3.9: Ampiezza dell'esponenziale su C6 con $W = 50 \mu m$

temperatura di 40°C. Dai grafici riportati nelle prime due immagini si vede che quando la tensione di soglia è valutata a $I_d = 400 \mu A$ per le tensioni di filling con $V_g = -1V$ e $V_g = -4V$, l'ampiezza rimane invariata, mentre per le altre due tensioni di gate si vede che tale ampiezza aumenta. si vede un aumento significativo dell'ampiezza quando la tensione di filling è $V_g = 1V$ in quanto in condizioni di OFF-State si vede un maggiore intrappolamento di carica. Nel grafico (b) si vede che il comportamento è analogo a quello che si vede nel grafico (a), con la differenza che l'ampiezza dell'esponenziale assume valori maggiori. Per quanto riguarda il grafico dell'ampiezza ricavato dalle curve della R_{on} si vede che per tutte le tensioni di filling tranne per $V_g = -4V$ l'ampiezza aumenta, per l'altra tensione si vede che l'ampiezza diminuisce a causa di un miglioramento delle performance del dispositivo dovute all'autoriscaldamento del medesimo dovuto alla corrente che circola che fa in modo di aumentare la temperatura nella zona attiva del dispositivo. L'aumento dell'ampiezza passando da tensioni di gate negative a tensioni di gate positive indica che polarizzando il dispositivo in OFF-State c'è un maggiore intrappolamento di carica rispetto a quando il dispositivo è polarizzato in ON-State.

Dai grafici riportati nelle figure 3.8 e 3.9 si ota che i punti non mostrano particolari dipendenze dalla tensione di drain, quindi probabilmente non ci sono effetti di Poole-Frenkel.

Andando a confrontare il comportamento delle $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ all'aumentare della temperatura si ottiene il grafico riportato nella figura 3.10.



Figura 3.10: Caratteristiche DC all'aumentare della temperatura

Da questo grarfico si vede che all'aumentare della temperatura si ha un miglioramento delle caratteristiche del dispostivo, diversamente da quello che si può aspettare. Visto questo miglioramento nelle sezioni successive in cui si discute dei risultati ottenuti dalle misure di $I_d - V_d$ e $I_d - V_g I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide in condizione di ON-State viene evidenziato un miglioramento delle performance del dispositivo in quanto il passaggio della corrente provoca il suo autoriscaldamento portando al miglioramento delle caratteristiche.

3.5 Step-Stress

Per verificare la tensione operativa massima del dispositivo, viene effettuata una misura chiamata step-stress. Questa misura permette di monitorare la deriva dei parametri del dispositivo, quali caratteristiche di uscita, $I_d - V_g$ e diodi e di trovare i limiti massimi operativi, nonchè i valori per i quali effettuare stress a bias costante, quando il dispositivo è sottoposto ad una condizione di stress.

Per comprendere meglio il procedimento per eseguire questa misura, si fa riferimento allo schema a blocchi riportato nella figura 3.11.



Figura 3.11: Schema a blocchi step-stress

Dallo schema a blocchi si vede che la prima misura è una caratterizzazione DC preliminare completa, cioè si va a misurare la caratteristica di uscita, la $I_d - V_g$ e i diodi, misure discusse nel paragrafo precedente, il diodo presente tra gate e source (Diodo GS) e il parallelo tra il diodo tra gate-source e il diodo gate-drian (Diodo GSD). Per misurare il diodo gate-source nell'apposito programma LabView si imposta uno sweep di tensione al gate tra 4.5V e -4.5V, lasciando il source a massa e il drain flottante. Per misurare il parallelo tra il diodo gate-source e gate-drain, nell'apposito programma Lab-View si imposta uno sweep di tensione al gate tra 4.5V, mettendo a massa sia il terminale di drain, sia il terminale di source.

I due passi successivi consistono nell'impostare nel programma LabView che controlla lo step-stress la durata temporale dello stress, per le misure effettuate in questo capitolo la durata del singolo step è di 1 ora, la tensione di gate e quella di drain che verranno poi imposte ai terminali del dispositivo tramite la coppia di punte.

Il passo successivo consiste nel far partire la misura con i paramentri impostati in precedenza.

Finito il tempo dello stress, si procede andando ad eseguire una nuova caratterizzazione DC completa per vedere se il dispositivo è ancora funzionante oppure se durante lo stress c'è stata la rottura del dispositivo.

Terminata la caratterizzazione DC, se il dispositivo è ancora funzionante, si aumenta di uno step la tensione al drain e si ricomincia con lo stress. Se dalla caratterizzazione DC si vede che il dispositivo in esame non è più funzionante, la misura finisce e la tensione operativa massima è la tensione applicata al drain durante l'ultimo step dello stress.

Per eseguire le misure il setup è lo stesso utilizzato per la caratterizzazione DC, cioè il dispositivo viene contattato tramite una coppia di punte Picoprobe RF GSG 150 LP, che con due cavi coassiali BNC e un adattatore SMA-BNC vanno a collegarsi al parameter analyzer E5263A dove la Medium Power SMU è collegata al terminale di gate e la High Power SMU è collegata al drain del dispositivo.

In base al valore di tensione impostato al terminale di gate si può fare uno stress con il dispositivo in OFF-State, in ON-State oppure in SEMI-ON-State. Nelle seguenti sezioni vengono discussi i risultati ottenuti nelle tre condizioni e le tensioni utilizzate per avere le tre condizioni di funzionamento del dispositivo.

3.5.1 Step-Stress in SEMI-ON-State

Per portare il dispositivo a funzionare in SEMI-ON-State, si impone la tensione al gate pari a 0V. La tensione di drain iniziale per lo stress è $V_d = -10V$. Ad ogni step dello stress la tensione di drain viene aumentata in modulo di 10V fino alla rottura del dispositivo. Per effettuare questa misura, il dispositivo utilizzato è il MESFET B1 che presenta una $W = 100\mu m$, per la localizzazione del dispositivo si può fare riferimento alla figura 3.1. La durata degli step dello stress è di 1 ora



Figura 3.12: Concatenazione Stress SEMI-ON su B1 con $W = 100 \mu m$

Nella figura 3.12 è riportato il risulato della concatenazione degli step di stress effettuati, sia per quanto riguarda la corrente di gate che per la corrente di drain. Come si può vedere il campione in questa condizione di funzionamento si è rotto all'inizio dello step con tensione di drain pari a -30V, in quanto nel grafico che mostra l'andamento della corrente di drain si vede un picco e poi la corrente diminuisce. Per quanto riguarda la corrente di gate non si vede alcun andamento particoalre in quanto quello che viene visualizzato è il rumore proprio del semiconductor parameter analyzer.



Figura 3.13: Potenza durante lo stress su B1 con $W = 100 \mu m$

Nella figura 3.13 è riportato l'andamento della potenza normalizzata rispetto alla lunghezza del finger di gate (W). Dalla figura si vede che la potenza aumenta andando avanti con lo stress in quanto si ha un aumento della tensione imposta per lo stress e contemporaneamente si ha un aumento della corrente e quindi si ha un aumento della potenza. La rottura del dispositivo avviene alla potenza di 0.167W/mm

Nelle seguenti figure è riportato l'andamento delle caratteristiche di uscita prese alla tensione maggiore, cioè $V_g = -4V$ per la caratteristica di uscita e $V_d = -24V$ per $I_d - V_q$, all'aumentare della tensione di stress.

Dalle caratteristiche di uscita si vede che il dispositivo all'aumentare dello stress peggiora le caratteristiche a causa della creazione di nuovi difetti all'interno del diamante, che vanno ad aumentare il valore della R_{on} e spostano il valore della tensione di soglia verso valori più negativi rispetto al valore di partenza. Questi due fatti si possono vedere dai grafici della figura 3.14 dove



Figura 3.14: (a): confronto ; (b): confronto $I_d - V_q$ su B1 con $W = 100 \mu m$



Figura 3.15: Transconduttanza su B1 con $W = 100 \mu m$

per la variazione della R_{on} si vede che la pendenza della curva nella zona vicino all'origine diminuisce, e questo implica un aumento della resistenza. Per quanto riguarda lo shift della tensione di soglia, si vede chiaramente che la $I_d - V_g$ eseguita nei diversi istanti di stress si sposta verso destra, andando quindi a spostare la tensione di soglia verso valori più negativi.

Dalla figura 3.15 si vede come varia la transconduttanza del dispositivo andando ad aumentare la tensione di stress applicata al drain. Dalla figura si vede che il valore di picco si riduce all'avanzare della misura, inoltre, si può notare uno spostamento della curva verso destra, spostamento che si ritrova anche nelle $I_d - V_g$ e dovuto al degrado del dispositivo a causa dell'aumento della concentrazione dei livelli profondi generati durante la misura.



Figura 3.16: (a): confronto Diodo GS; (b): confronto Diodo GSD su B1 con $W = 100 \mu m$

Per quanto riguarda i due diodi, si vede chiaramente dalla figura 3.16 che durante lo stress i due diodi rimangono invariati e quindi lo stress non va a modificare i diodi del dispositivo.

Partendo dalle curve ottenute nella caratterizzazione DC, dalla curva delle $I_d - V_d$ ottenuta a $V_g = -4V$ si calcola la resistenza come l'inverso della pendenza della curva nella zona dell'origine. Dalla curva delle $I_d - V_g$ ottenuta a $V_d = -24V$, si calcola la tensione di soglia imponendo come valore della corrente di drain di riferimento il valore $I_d = -5mA$. Andando poi a normalizzare i valori ottenuti al valore ottenuto dopo il primo step di stress, si ottiene il seguente grafico.

Andando ad osservare il grafico in figura 3.17, si vede che all'aumentare della tensione di stress imposta al drain la tensione di soglia si sposta verso valori più negativi rispetto al valore iniziale con un andamento lineare. Per quanto riguarda l'andamento della R_{on} si vede che anche in questo caso l'andamento mostrato dalla curva è un andamento crescente. Dal grafico si vede che i punti per avere un confronto significativo tra le due curve non sono molti a causa della rottura del dispositivo avvenuta ad una tensione molto bassa. Andando ad osservare gli andamenti si può comunque ipotizzare che il meccanismo che porta al degrado del dispositivo è il medesimo, cioè aumentando la tensione di stress si va ad aumentare la concentrazione di difetti e stati trappola all'interno del materiale.

In generale si può concludere che questa condizione risulta estremamente limitante per il campione, che mostra un'affidabilità limitata. Dal confron-



Figura 3.17: Confronto $R_{on} \in V_{th}$ al variare della tensione di stress su B1 con $W = 100 \mu m$

to con lo stress in ON-State, analizzato in seguito, si può probabilmente concludere che il dispositivo in esame non è rappresentativo del comportamento medio del wafer in quanto nello step-stress eseguito in condizione di ON-State, illustrato nella sezione 3.5.3, condizione molto più probante per il dispositivo si vede che la tensione operativa massima raggiunta prima della rottura del dispositivo è molto maggiore, infatti si raggiunge una tensione di drain $V_d = -85V$. Inoltre, anche il livello di potenza dissipata al quale avviene il fallimento è significativamente inferiore a quello rilevato negli altri stress.

3.5.2 Step-Stress in OFF-Sate

In condizioni di OFF-State il dispositivo si comporta come se fosse un interruttore aperto e quindi ci si aspetta che la corrente che circola nel dispositivo sia piccola perchè tale corrente è corrente di leakage in quanto il canale conduttivo non è formato. La corrente che circola è dovuta al campo elettrico che si viene a formare tra drain e source una volta che viene applicata una tensione al terminale di drain, mantenendo a massa il source, infatti tale campo elettrico accellera i pochi portatori presenti nella zona sotto il gate, e questo da luogo ad una piccola corrente in quanto la concentrazione di portatori in grado di contribuire a tale corrente è molto limitata. Per raggiungere la condizione di OFF-State si impone al terminale di gate la tensione $V_g = 1V$. La tensione di drain iniziale è $V_d = -10V$. Ad ogni step dello stress la tensione di drain viene aumentata in modulo di 10V fino alla rottura del dispositivo.

Per eseguire la misura si fa riferimento allo schema a blocchi della figura 3.18.



Figura 3.18: Schema a blocchi Step-Stress

Tale schema a blocchi è simile a quello riportato in figura 3.11, con la differenza che prima di iniziare lo stress, oltre alla caratterizzazione DC completa, cioè $I_d - V_d$, $I_d - V_g$ e diodi, vengono eseguite anche delle $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide iniziali. Durante il ciclo di stress, alla fine di ogni step si procede con la caratterizzazione DC completa e vengono eseguite anche le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide.

Le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide vengono eseguite a tre diversi valori di tensione di filling, $(V_g = 1; V_d = -10)$, $(V_g = 1; V_d = -20)$, $(V_g = 1; V_d = -30)$. Per avere poi un riferimento per la variazione della tensione di soglia e della resistenza Ron, si eseguono anche le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide con $(V_g = 0; V_d = 0)$ sia per quanto riguarda la fase di filling che per quella di recovery. Per qunto riguarda la tensione da applicare ai terminali per la fase di recovery , tali tensioni sono uguali per ogni valore della tensione di filling ed è $(V_g = 0; V_d = 0)$, cioè il dispositivo viene mantenuto in condizioni di riposo.

Questa misura viene effettuata sul MESFET B2 con $W = 100 \mu m$, per la localizazione del dispositivo, anche in questo caso si fa riferimento alla figura 3.1. Anche per questa misura la durata dello step dello stress è di 1 ora.

Nella figura 3.19 si vede la concatenazione degli step dello stress. Dal grafico della corrente di drain si vede che il dispositivo si rompe dopo circa mezz'ora dello step con $V_d = -100V$ in quanto si vede un picco in cui la corrente aumenta molto per poi scendere molto rapidamente. Nello stesso istante temporale, nel grafico della corrente di gate, si vede un picco, e quindi



Figura 3.19: Concatenazione Stress OFF su B2 con $W = 100 \mu m$

si può dire che in quell'istante temporale il dispositivo in esame si è rotto. Visto che la corrente di drain dopo la rottura ritorna verso lo 0, si può dire che la rottura ha portato il dispositivo a diventare una resistenza molto grande.

L'aumento della rumorosità della curva è dovuto alla creazione di cammini conduttivi metastabili. Mentre l'aumento della corrente di drain all'aumentare della tensione di stress è probabilmente dovuto ad effetti di canale corto.



Figura 3.20: Potenza durante lo stress su B2 con $W = 100 \mu m$

Nella figura 3.20 è riportato l'andamento della potenza normalizzata ri-

spetto alla lunghezza del finger di gate (W). Dalla figura si vede che la potenza aumenta andando avanti con lo stress in quanto si ha un aumento della tensione imposta per lo stress e contemporaneamente si ha un aumento della corrente, come si può vedere dal grafico (a) della figura 3.19, e quindi si ha un aumento della potenza. La rottura del dispositivo avviene ad una potenza di 3.25W/mm.



Figura 3.21: (a): confronto $I_d - V_d$; (b): confronto $I_d - V_g$ su B2 con $W = 100 \mu m$



Figura 3.22: Transconduttanza su B2 con $W = 100 \mu m$

Nella figura 3.21 è riportato il confronto delle caratteristiche di uscita prese al valore massimo della tensione di gate per quanto riguarta la $I_d - V_d$,



Figura 3.23: (a): confronto Diodo GS; (b): confronto Diodo GSD su B2 con $W = 100 \mu m$

e al valore massimo della tensione di drain per quanto riguarda la misura di $I_d - V_g$. Dai due grafici si può vedere che aumentando la tensione di stress, il dispositivo in esame degrada andando ad aumentare il valore di R_{on} , tale fatto si vede dal grafico delle $I_d - V_d$ in quanto la pendenza della curva in un intorno dell'origine diminuisce, il che implica un aumento della resistenza. Tale aumento è dovuto all'aumentare dello scattering su livelli profondi oppure ci può essere una variazione nelle performance della terminazione idrogeno. Dal grafico della $I_d - V_g$, si vede che la corrente massima cala, ma il fatto più importante è che si nota uno shift della curva verso destra, il che implica una variazione del valore della tensione di soglia del dispositivo, che all'aumentare della tensione dello stress, si sposta verso valori più negativi rispetto al valore iniziale.

Nella figura 3.22 si vede l'andamento della transconduttanza all'aumentare della tensione di stress imposta al drain. Da questo grafico si vede che procedendo con la misura il picco della transconduttanza diminuisce, inoltre, si vede uno shift della curva verso destra, fatto che si ritrova anche nelle $I_d - V_g$ e dovuto all'aumentare della concentrazione di livelli profondi generati dallo stress.

Per quanto riguarda l'andamento dei diodi durante lo stress, dai grafici della figura 3.23, si vede che i diodi non si modificano all'aumentare della tensione di stress, e quindi all'aumentare del degrado del dispostivo. I due Diodi subiscono una variazione importante nel momento in cui il dispositivo si rompe.

Nella figura 3.24 è riportato l'andamento della Ron nella fase di filling ottenute dalle $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide. Dalle curve si vede che l'andamento è uguale per le tre curve in cui la tensione di drain non è nulla,



Figura 3.24: Ron con $V_g = 1V$ dopo step di stress con $V_d = -10V$ su B2 con $W = 100 \mu m$

inoltre si può vedere che l'ampiezza del transitorio aumenta all'aumentare della tensione di drain in quanto aumentando la tensione applicata al drain aumenta la carica che può essere intrappolata negli stati trappola presenti nel materiale e questo aumento di carica intrappolata comporta un aumento dell'ampiezza del transitorio descritto dalle curve.

Nella figura 3.25 è riportato l'andamento della R_{on} e della sua versione normalizzata. Dal grafico di sinistra si vede che la resistenza iniziale aumenta all'aumentare della tensione di stress applicata al drain, durante la misura si vede che la resistenza cala con un andamento monotono decrescente. Dal grafico di destra si vede che l'ampiezza del transitorio descritto dalle curve aumenta all'aumentare della tensione di stress.

Nella figura 3.26 è riportato l'andamento della V_{th} e della sua versione normalizzata. Dal grafico di sinistra si vede che la tensione di soglia si sposta verso valori negativi all'aumentare della tensione di stress applicata al drain, durante la misura si vede che la tensione di soglia cala con un andamento esponenziale. Dal grafico di destra si vede la versione normalizzata dell'andamento della V_{th} ottenuto andando a sottrarre alle curve il primo valore. Da questo grafico si vede che all'aumentare della tensione di stress l'ampiezza del transitorio aumenta.

L'aumento della resistenza, lo shift della tensione di soglia, l'aumentare del-



Figura 3.25: (a): R_{on} durante il recovery; (b): R_{on} normalizzata durante il recovery su B2 con $W = 100 \mu m$ con tensione di filling ($V_g = 1V$; $V_d = -30V$)



Figura 3.26: (a): V_{th} durante il recovery; (b): V_{th} normalizzata durante il recovery su B2 con $W = 100 \mu m$ con tensione di filling ($V_g = 1V$; $V_d = -30V$)

l'ampiezza del transitorio descritto dalle R_{on} e dalle V_{th} sono causati dall'aumentare della concentrazione di difetti e di stati trappola presenti nel dispositivo generati durante lo stress a causa dell'elevata tensione imposta al drain.

Andando a rappresentare in uno stesso grafico la variazione percentuale della resistenza e della tensione di soglia, si vede che la variazione di questi due valori è correlata e questo implica che alla base di questa variazione ci sia un meccanismo comune.

Dal grafico riportato in figura 3.27 si vede che c'è una correlazione nella



Figura 3.27: Confronto $R_{on} \in V_{th}$ al variare della tensione di stress su B2 con $W = 100 \mu m$

variazione della resistenza e della tensione di soglia in funzione della tensione applicata al drain durante lo stress, il che indica che il meccanismo che fa aumentare la resistenza e spostare la tensione di soglia può essere lo stesso. Le variazioni della tensione di soglia e della resistenza sono dovute al riempimento e allo svuotamento dei livelli profondi ritrovati nella misura delle $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide al variare della temperatura analizzate nella sezione 3.4. Da questa sezione si è trovato che nel materiale sono presenti dei livelli profondi causati da difetti estesi o da minibande di energia, con una energia di attivazione di $E_a \cong 0.3 eV$. Tali difetti sono già presenti all'inizio della misura e con l'aumentare della tensione di stress applicata al drain, si va ad aumentare la loro concentrazione, andando ad aumentare la variazione di tensione di soglia e di resistenza durante le misure di $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide.

Per andare a studiare una eventuale relazione tra il valore della resistenza del dispositivo ottenuto dalle $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide, e l'ampiezza del transitorio descritto da tali curve, si ottiene il grafico mostrato nella seguente figura 3.28.

Dal grafico in figura 3.28 si vede che andando ad aumentare la tensione di stress applicata al drain, c'è una correlazione tra il valore assunto dalla resi-



Figura 3.28: Correlazione Ron e ampiezza transitorio Ron su B2 con $W=100 \mu m$

stenza e l'ampiezza del transitorio descritto dalle curve di resistenza nei vari step dello stress. Questa correlazione indica l'incremento della concentrazione di livelli profondi con energia di attivazione $E_a = 0.3 eV$ come probabile causa del degrado del campione.

3.5.3 Step-Stress in ON-State

Un MESFET polarizzato in ON-State si comporta come un interruttore chiuso in quanto è in grado di far scorrere la massima corrente possibile nel dispositivo, questo perchè il canale conduttivo è completamente formato e una volta che viene applicata una differenza di potenziale tra drain e source, si genera un campo elettrico tra i due terminali che permette ai portatori nel canale di muoversi in una direzione ben precisa dando luogo ad una corrente elevata.

Per raggiungere la condizione di ON-State, bisogna imporre al terminale di gate una tensione in modulo superiore alla tensione di soglia del dispositivo in esame, per questa misura si è deciso di applicare al gate $V_g = -4V$ che in modulo è un valore superiore alla tensione di soglia del dispositivo che è $V_{th} \cong -1V$. La tensione iniziale di stress impostata al drain è $V_d = -5V$, in questa misura dopo ogni step dello stress la tensione di stress al drain viene

aumentata di -5V.

Per eseguire la misura si fa riferimento alla figura 3.18, quindi si parte con una caratterizzazione DC iniziale per poi proseguire con le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide iniziali. Finita la caratterizzazione preliminare, si comincia con gli step di stress della durata di 1 ora. Finito lo stress si fa una nuova caratterizzazione DC e le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide per verificare le condizioni del dispositivo dopo lo step di stress appena concluso. Infine, se il dispositivo si è rotto, la misura è finita, mentre se il dispositivo è ancora funzionante, si procede andando ad aumentare la tensione al drain e si ricomincia con un nuovo step di stress

Per quanto riguarda le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide, la misura di riferimento si ottiene con $(V_g = 0; V_d = 0)$ sia per la fase di filling che per quella di recovery. Oltre alla misura che viene utilizzata come riferimento per le variazioni dei parametri ottenuti, le altre misure di $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide vengono effettuate in divese condizioni, queste condizioni sono tre misure con il dispositivo in ON, altre tre misure con il dispositivo in ON ma con una tensione di gate in modulo inferiore rispetto al caso precedente, tre misure in SEMI-ON, infine, vengono eseguite tre misure con il dispositivo in OFF. In particolare in seguito vengono elencate le coppie di tensione di gate e tensione di drain nell'ordine in cui le misure vengono effettuate: ON-State $(V_g, V_d) = (-4, -5), (-4, -10), (-4, -15), ON-State (V_g, V_d) = (-1, -5), (-1, -10), (-1, -15), SEMI-ON-State (V_g, V_d) = (0, -5), (0, -10), (0, -15),$ $OFF-State <math>(V_g, V_d) = (1, -5), (1, -10), (1, -15).$

Questa misura viene effettuata sul MESFET B6 con $W = 200 \mu m$, per la localizazione del dispositivo, anche in questo caso si fa riferimento alla figura 3.1.



Figura 3.29: Concatenazione Stress ON su B6 con $W = 200 \mu m$

Nella figura 3.29 si vede un grafico che mostra la concatenazione della corrente di drain durante lo stress, nell'altro grafico è riportata la concatenazione della corrente di gate durante lo stress. Dal grafico della corrente di drain si vede che il dispositivo si è rotto dopo lo step di stress con $V_d = -85V$ in quanto si vede che la corrente cala rapidamente verso lo zero, e nello stesso istante temporale in cui c'è il picco nella corrente di drain, in quella di gate si vede un picco, il che indica che il dispositivo in quel momento si è rotto, ed andando ad osservare la corrente di drain, si vede che questa torna verso lo zero il che indica che il dispositivo dopo la rottura è diventato un circuito aperto.

Come si può vedere dal grafico in cui è riportata la concatenazione della corrente di drain durante lo stress, si può anche vedere una ottima capacità del diamante di operare ad alta temperatura, in quanto si può notare che la robustezza è comparabile a quella ottenuta nello stress in OFF-State. L'aumento della temperatura nello stresso in ON-State è dovuto alla maggiore corrente che scorre nel dispositivo, che porta al riscaldamento del dispositivo. Dal grafico di figura 3.29 si vede che la corrente di drain rimane costante nel corso della misura, il che dimostra che il diamante riesce a smaltire molto bene il calore generato durante il funzionamento.

L'aumento della rumorosità della corrente di drain all'aumentare della tensione di stress imposta al drain è dovuto alla creazione di cammini conduttivi metastabili paralleli al cammino principale formato dal canale di lacune generato tra drain e source.



Figura 3.30: Potenza durante lo stress su B6 con $W = 200 \mu m$

Nella figura 3.30 è riportato l'andamento della potenza normalizzata rispetto alla lunghezza del finger di gate (W). Dalla figura si vede che la potenza aumenta andando avanti con lo stress in quanto si ha un aumento della tensione imposta per lo stress e contemporaneamente si ha un aumento della corrente, come si può vedere dal grafico (a) della figura 3.29, e quindi si ha un aumento della potenza. Dal grafico si può vedere che nel momento in cui il dispositivo si rompe la potenza raggiunta è elevata, infatti si raggiungono 12.5W/mm.



Figura 3.31: (a): Confronto $I_d - V_d$; (b): Confronto $I_d - V_g$ su B6 con $W = 200 \mu m$



Figura 3.32: Transconduttanza su B6 con $W = 200 \mu m$

Nella figura 3.31 è riportato il confronto delle caratteristiche di uscita prese al valore massimo della tensione di gate per quanto riguarta la $I_d - V_d$,

e al valore massimo della tensione di drain per quanto riguarda la misura di $I_d - V_g$. Dai due grafici si può vedere che aumentando la tensione di stress, il dispositivo in esame degrada andando inizialmente ad aumentare il valore di R_{on} , tale fatto si vede dal grafico delle in quanto la pendenza della curva in un intorno dell'origine inizialmente diminuisce, il che implica un aumento della resistenza, andando avanti con lo stress, però, si vede che la pendenza torna a salire lievemente implicando una diminuzione della resistenza. Dal grafico della $I_d - V_g$, si vede che la corrente massima inizialmente cala per poi andare ad aumentare verso la fine dello stress, ma li fatto più importante è che si nota uno shift della curva verso destra, il che implica una variazione del valore della tensione di soglia del dispositivo, che all'aumentare della tensione di valore inizialmente si sposta verso valori più negativi rispetto al valore iniziale, per poi ritornare verso il valore iniziale spostando la tensione di soglia verso sinistra.

Nella figura 3.32 è riportato l'andamento della transconduttanza ricavata dalla misure eseguite nella caratterizzazione post stress. Dal grafico si vede che il valore di picco diminuisce all'aumentare della tensione di stress, inoltre si vede uno shift delle curve verso destra. La diminuzione del valore di picco e lo shift delle curve sono effetti dovuti all'aumentare della concentrazione di stati trappola e di difetti dovuti all'elevato valore che la tensione di stress imposta al drain raggiunge e all'elevato valore della corrente che circola nel dispositivo durante lo stress.



Figura 3.33: (a): confronto Diodo GS; (b): confronto Diodo GSD su B6 con $W = 200 \mu m$

Per quanto riguarda l'andamento dei diodi durante lo stress, dai grafici della figura 3.33, si vede che la corrente che scorre attraverso i due diodi parassiti tende ad aumentare, questo implica che il degrado al dispositivo generato dallo stress, va a modificare le caratteristiche dei diodi parassiti andando ad aumentare la corrente che questa coppia di diodi può lasciare passare grazie a meccanismi di conduzione come il trap-assisted tunneling.



Figura 3.34: Confronto $R_{on} \in V_{th}$ al variare della tensione di stress su B6 con $W = 200 \mu m$

Dal grafico riportato in figura 3.34 si vede l'andamento della resistenza e della tensione di soglia, calcolata a $I_d = -3mA$, normalizzate al loro valore iniziale al variare della tensione di stress applicata al drain. Da questo grafico si può dire che probabilmente i meccanismi che aumentano il valore della resistenza e spostano il valore della tensione di soglia sono diversi. Ci può esseere la generazione di stati trappola diversi o in quantità e con andamento temporale in regioni diverse del campione.

Nei grafici riportati in figura 3.35 si vede l'andamento della resistenza e della resistenza normalizzata nella fase di recovery, dopo che il campione è stato sottoposto alla tensione di filling $(V_g = -4; V_d = -15)V$. Dal grafico di sinistra, si vede che la resistenza all'aumentare del tempo di misura aumenta perchè c'è un miglioramento delle performance durante la fase di filling introdotto dall'autoriscaldamento del dispositivo in esame dovuto dall'elevato valore di corrente che riesce a scorrere nel dispositivo quando polarizzato in ON-State. Un altro fatto da notare è che all'aumentare della tensione di stress il valore iniziale della resistenza aumenta, ma dalla tensione di stress $V_d = -50V$, si vede una diminuzione del valore iniziale in maniera consistente



Figura 3.35: (a): R_{on} durante il recovery; (b) R_{on} normalizzata durante il recovey su B6 con $W = 200 \mu m$



Figura 3.36: (a): R_{on} durante il recovery; (b) R_{on} normalizzata durante il recovery su B6 con $W = 200 \mu m$

con i dati riportati per la caratterizzazione DC. Dal grafico di destra si vede l'ampiezza del transitorio descritto dalle curve all'aumentare della tensione di stress, si vede che inizialmente il valore dell'ampiezza aumenta, per poi dopo la tensione di stress di $V_d = -50V$ calare. In questo caso. Può essere che i livelli profondi responsabili per il comportamento ad alte correnti aumentino in concentrazione fino allo step con Vd = -50V per poi subire un annealing oppure avere un più difficile riempimento a tensioni più elevate, questo fatto può essere conseguenza dell'aumentare della temperatura dovuta all'autoriscaldamento del campione a causa dell'elevato valore di corrente in circolo.

Nei grafici riportati in figura 3.36 si vede l'andamento della resistenza e della resistenza normalizzata nella fase di recovery, dopo che il campione è stato sottoposto alla tensione di filling $(V_g = 1; V_d = -30)V$. Da questi grafici si vede che le curve hanno un andamento monotono decrescente, se guardate rispetto al tempo della misura, perchè si ha un recupero dopo le condizioni di intrappolamento introdotte nella condizione di OFF-State. Andando ad osservare il grafico rispetto alla tensione di stress, si vede che si ha un incremento del valore della resistenza iniziale e dell'ampiezza del transitorio descritto dalle curve, ma a differenza del caso descritto in precedenza, in questo caso non si ha un aumento iniziale per poi avere una diminuzione, ma si ha solo un aumento del valore della tensione di stress applicata al drain a causa dell'aumento della concentrazione di livelli profondi causati dallo stress. in questo caso, l'assenza di dissipazione di potenza porta correttamente a vedere un incremento nella concentrazione di difetti durante lo stress.



Figura 3.37: (a): V_{th} durante il recovery; (b) V_{th} normalizzata durante il recovery su B6 con $W = 200 \mu m$ calcolata a $I_d = -1mA$

Nei grafici riportati in figura 3.37 si vede l'andamento della tensione di soglia e la sua versione normalizzata, ottenuta per sottrazione tra i valori nella curva e il suo valore iniziale, nella fase di recovery, dopo che il campione è stato sottoposto alla tensione di filling $(V_g = -4; V_d = -15)V$. Dal grafico di sinistra si vede che la tensione di soglia ha un andamento monotono crescente all'aumentare del tempo di misura a causa del recupero dopo la fase di filling in cui il valore della tensione di soglia si sposta verso valori più positivi in quanto nella fase di filling si potrebbe avere una maggior ionizzazione della



Figura 3.38: (a): V_{th} durante il recovery; (b) V_{th} normalizzata durante il recovery su B6 con $W = 200 \mu m$ calcolata a $I_d = -1mA$

terminazione ad idrogeno. Un altro fatto da notare è che il valore iniziale della tensione di soglia si sposta verso valori più negativi rispetto al valore iniziale, fino alla tensione di stress $V_d = -50V$, tensione alla quale si vede che la tensione di soglia tende a ritornare verso il valore iniziale. Dal grafico di destra si può vedere il comportamento dell'ampiezza del transiente descritto dalle curve della tensione di soglia, da questo grafico si vede che inizialmente si ha un aumento dell'ampiezza del transiente, mentre a partire dalla caratterizzazione dopo lo stress con $V_d = -50V$, si vede che l'ampiezza tende a diminuire. Dalla figura 3.38 si vede il grafico che mostra l'andamento della tensione di soglia nella fase di recovery dopo la fase di filling con tensione $(V_q = 1; V_d = -30)V$, si vede che le curve hanno un andamento monotono decrescente a causa dell'aumento della concentrazione di livelli profondi introdotti dallo stress, se guardate rispetto al tempo della misura. Anche per questo casi si vede che il valore iniziale della tensione di soglia si sposta verso valori più negativi rispetto al valore iniziale, fino alla tensione di stress di $V_d = -50V$, tensione alla quale il valore iniziale della V_{th} tende a ritornare verso il valore iniziale. Dal grafico di destra si vede che inizialmente si ha un incremento del valore dell'ampiezza del transitorio, mentre a partire dalla caratterizzazione dopo lo step di stress con $V_d = -50V$, si vede che anche in questo caso, si ha una diminuzione del valore del transitorio descritto dalle curve, quindi inizialmente si ha uno aumento per poi avere una diminuzione dell'ampiezza del transitorio.

Capitolo 4

Secondo set di campioni

In questo capitolo verranno forniti dettagli sul secondo set di campioni analizzati, sulle misure effettuate e sulle procedure adotatte per eseguire le misure.

4.1 Campioni

Nella figura 4.1 è riportato uno schema dei dispositivi analizzati.

Da questa figura, oltre alla disposizione dei campioni, si può vedere anche la convenzione utilizzata per identificare ogni singolo campione. Infatti, si vede che ogni singolo dispositivo è identificato univocamente da una coppia lettera-numero. I dispositivi presenti in questo wafer mostrano tutti la stessa lunghezza del canale di gate, $L_{gate} = 1\mu m$, mentre per quanto riguarda la larghezza, ci sono cinque valori diversi ()dispositivi con $W = 25\mu m$, $W = 50\mu m$, $W = 75\mu m$, $W = 100\mu m$, $W = 150\mu m$). Nella parte bassa della figura 4.1 sono presenti anche dei diodi e dei FatFET, che in questo elaborato non sono stati analizzati.

Anche questi dispositivi presentano una configurazione RF con il terminale di gate nel lato sinistro e il terminale di drain nel lato destro, mentre i terminali di source sono i quattro terminali esterni. Vista la minor lunghezza del canale rispetto all'altro set di campioni, per contattare il dispositivo si utilizzano una coppia di punte RF con una distanza tra le tre punte inferiore rispetto al caso precedente, le punte utilizzate sono punte Picoprobe GSG 125 LP.



Figura 4.1: Schema del wafer 2 con in evidenza la convenzione utilizzata per identificare i ispositivi

4.2 Caratterizzazione DC

Al fine di avere una conoscenza più completa possibile dei dispositivi in esame si procede anche in questo caso ad una caratterizzazione DC preliminare dei transistor, testando la dipendenza della corrente di drain imponendo in un caso la tensione al gate e variando la tensione al drain, in questo caso si parla di misura delle caratteristiche di uscita, $I_d - V_d$. Nell'altro caso, si impone la tensione al drain e si va a variare la tensione al gate, in questo caso si parla di transcaratteristica o $I_d - V_q$.

Un'altra misura che fa parte della caratterizzazione DC è la misura che va a vedere il comportamento dei diodi che vengono a formarsi tra gate e source e il parallelo dei diodi gate-source e gate-drain. Per effettuare queste misure si fa uno sweep della tensione al gate tra $V_g = 4.5V$ e $V_g = -4.5V$, per il primo diodo si impone la tensione al gate, mantenendo il source a massa e lasciando flottante il terminale di drain. Per la misura del secondo diodo si impone la tensione al gate e si collegano a massa sia il terminale di source che quello di drain.

Per effettuare la caratterizzaizone DC il wafer viene posto su una piastra di supporto, detta *chuck*, all'interno di una probe station; quest'ultima funge da gabbia di Faraday schermando il campione da campi elettromagnetici ambientali e dalla luce esterna.

Si procede quindi a contattare il dispositivo che si vuole misurare utilizzando due micromanipolatori e una coppia di punte RF collegate, tramite cavi biassiali BNC, ad un semiconductor parameter analyzer, l'Agilent E5263A. Il parameter analyzer supporta due canali di SMU (Source/Monitor Units) per le misure di tensione e corrente; si usa la High Speed High Power SMU per imporre la tensione e misurare la corrente di drain e la High Speed Medium Power SMU per imporre la tensione e misurare la corrente di gate, in quanto la tensione da applicare al drain e la corrente che viene misurate al terminale è maggiore rispetto alla tensione imposta e alla corrente misurata al gate. Visto che la potenza è il prodotto di tensione e corrente, la potenza che si trova al drain è maggiore rispetto alla potenza che si trova al gate, per questo motivo per il terminale di drain è stata utilizzata la SMU High Power, mentre per il terminale di gate è stata scelta la SMU Medium power. Agilent E5263A viene quindi connesso tramite un connettore GPIB-USB ad un computer dove, attraverso software sviluppati in ambiente LabView, si pilota lo strumento in modo tale da ottenere le caratteristiche statiche del dispositivo (caratteristiche di uscita, $I_d - V_d$, transcaratteristica $I_d - V_g$ e diodi).

Il setup appena illustrato è lo stesso anche per le misure descritte nelle seguenti sezioni, con la sola differenza dell'inserimento di una camera CCD Andor *iXon* in grado di rilevare i fotoni emessi dal dispositivo, per effettuare le misure di elettroluminescenza.

Nella figura 4.2 sono riportate le caratteristiche DC per un campione rappresentativo presente nel wafer. Dall'immagine (a) si vede la caratteristica di uscita, cioè si va a vedere la dipendenza della corrente di drain imponendo una tensione costante al gate ed andando a variare la tensione al drain, tale tensione viene fatta variare tra 0V e -25V. Lo sweep di tensione al drain viene ripetuto per diversi valori della tensione al gate riportati nella legenda del grafico. Da questo grafico si possono riconoscere due zone di funzionamento del dispositivo. La prima zona è quella per valori della tensione di drain in modulo inferiori a 5V in cui il dispositivo è nella zona di triodo o zona resistiva nella quale il dispositivo si comporta come una resistenza, cioè la corrente di drain cresce in modo lineare con la tensione applicata al drain. La seconda zona di funzionamento la si riconosce per valori di tensioni di drain in modulo superiori a 5V, questa zona di funzionamento si chiama zona di saturazione in cui le curve sono piatte e la corrente di drain non mostra



Figura 4.2: (a) : Caratteristiche di uscita $(I_d - V_d)$; (b) : Transcaratteristica $(I_d - V_g)$

particolari dipendenze dalla tensione di drain.

Nell'immagine (b) si vede il grafico della $I_d - V_g$, cioè si va a vedere la dipendenza della corrente di drain imponendo una tensione costante al drain ed andando a variare la tensione al gate, tale tensione varia tra 1V e - 4.5V. Lo sweep di tensione al gate viene ripetuto per diversi valori della tensione di drain riportati nella legenda del grafico. Da questo grafico si può calcolare la tensione di soglia del dispositivo andando a fissare un valore della corrente di drain, e la tensione di soglia (V_{th}) è il valore della tensione di gate alla quale la corrente di drain è uguale al valore della corrente fissata. Dal grafico si può riconoscere il meccanismo di funzionamento del dispositivo. Per valori di tensione di gate compresi tra 1V e -0.5V, la corrente che circola nel dispositivo è circa 0A, questo perchè il canale conduttivo non è ancora formato, quando poi la tensione al gate raggiunge il valore della tensione di soglia, la corrente di drain aumenta. Più elevato è il valore della tensione applicata al drain, maggiore è la corrente che riesce a scorrere nel dispositivo, perchè il campo elettrico che si forma tra source e drain aumenta e quindi aumenta anche la velocità dei portatori e quindi nello stesso intervallo di tempo la carica che passa nel dispositivo è maggiore, e questo implica un aumento della corrente di drain del dispositivo nella zona di funzionamento lineare.

Nella figura 4.3 sono riportati gli andamenti dei due diodi analizzati per un campione rappresentativo presente nel wafer. Dall'immagine (a) si può vedere l'andamento del diodo G-S, dal grafico si vede che quando il dispositivo è acceso, cioè per tensioni di gate più negative della tensione di soglia, la corrente che riesce a scorrere nel diodo assume valori significativi. Quan-



Figura 4.3: (a) : Diodo G-S; (b) Parallelo dei diodi G-S e G-D

do la tensione di gate assume valori maggiori della tensione di soglia e poi positivi, si vede che il diodo passa in polarizzazione inversa e quaindi non conduce più, infatti la corrente misurata è il rumore di fondo del parameter. Dall'immagine (b) si vede l'andamento del diodo parallelo tra i diodi G-S e G-D, da questa figura si vede che per valori della tensione di gate più negativi della V_{th} il diodo è in polarizzazione diretta e quindi la corrente che scorre nel dispositivo assume valori significativi. Portando la tensione di gate verso valori positivi, la corrente che scorre nel diodo diminuisce fino a quando la corrente che viene misurata è solo il rumore di fondo del parameter.

4.3 Radiazione di frenamento

I dispositivi in esame in questo lavoro non sono stati progettati per emettere fotoni, ma all'interno del dispositivo possono essere presenti processi che originano radiazione di frenamento. Tale fenomeno avviene perchè il campo elettrico che si viene a formare tra drain e source accellera i portatori che si trovano nella zona al di sotto del gate fornendo loro energia cinetica. I portatori accelerati continuano ad aumentare la velocità e quindi la loro energia cinetica fino a quando non c'è uno scontro tra il portatore e un atomo del reticolo cristallino, o un evento di scattering con un altro elettrone o con un fonone. Lo scontro fa perdere l'energia cinetica accumulata al portatore, tale energia per il principio di conservazione dell'energia viene emessa sotto forma di fotone.



Figura 4.4: Principio di funzionamento della radiazione di frenamento

Nella figura 4.4 si vede che un elettrone che si trova in banda di conduzione viene accellerato dal campo elettrico facendo in modo che l'energia dell'elettrone aumenti. Tale aumento di energia lo si può vedere dal fatto che la distanza in energia tra l'elettrone e il bordo della banda di conduzione nel primo e nel secondo istante aumenta. Un elettrone acquista energia nel tempo in cui la particella compie quello che viene definito libero cammino medio, che è lo spazio che l'elettrone riesce a percorrere senza urtare gli atomi che compongono il reticolo cristallino o subire altri fenomeni di scattering. Una volta che l'elettrone colpisce un atomo del reticolo, l'energia cinetica posseduta dal portatore viene persa e per il principio di conservazione dell'energia, tale energia viene emessa sotto forma di fotone. Questo processo è illustrato dalla freccia blu nella figura 4.4 dove si vede la perdita di energia in quanto il portatore si avvicina al limite della banda di conduzione e l'energia sottratta al portatore viene convertita in un fotone. Una volta che il portatore cede la sua energia cinetica, si allontana dall'atomo che aveva urtato e grazie al campo elettrico ricomincia il processo, portando l'elettrone ad acquistare nuovamente energia cinetica.

Nella figura 4.5 è riportato lo spettro generato dalla radiazione di frenamento. Da questo grafico si vede che per alti valori di energia l'intensità della radiazione cala, questo perchè per accumulare valori elevati di energia, il portatore dovrebbe muoversi senza avere urti per tratti lunghi il che è poco probabile. Per valori di energia bassi l'intensità della radiazione è bassa perchè per accumulare poca energia, il portatore dovrebbe subire urti molto ravvicinati, cioè lo spazio percorso tra un urto e il successivo è limitato. Lo spettro presenta un picco in prossimità dell'energia che corrisponde


Figura 4.5: spettro della radiazione di frenamento

all'energia che il portatore riesce ad accumulare durante il cammino libero medio.

4.4 Step-Stress con elettroluminescenza

Questo tipo di misura consiste nell'eseguire uno step-stress simile a quelli già effettuati per il set di campioni precedenti, con la differenza che in questo caso oltre alle correnti di drain e di gate durante lo stress, viene monitorata anche l'emissione di fotoni da parte del dispositivo, finita la fase di stress, viene eseguita anche la caratterizzazione DC.

La misura è stata eseguita applicando la tensione di gate per impostare una regione di funzionamento del dispositivo, in contemporanea, viene impostata anche la tensione di drain iniziale, poi, per 120 secondi (2 minuti) viene eseguito lo stress andando a monitorare l'emissione dei fotoni. Terminato lo stress c'è una fase di attesa di 10 secondi, passati i quali si procede eseguendo la caratterizzazione DC post Stress, per poi andare ad aumentare la tensione di drain per ricominciare con un nuovo stress fino a quando non avviene la rottura del dispositivo.

L'acquisizione dell'elettroluminescenza prodotta dal dispositivo avviene grazie ad una camera (iXon) CCD (Charge-coupled device) in modalità film con un periodo di campionamento e un periodo di acquisizione rispettivamente di 10sec e 5sec, mentre il guadagno di elettroluminescenza introdotto dall'elettronica presente per l'acquisizione dei fotoni è di 100 su una scala che va da 1 a 255. La camera di acquisizione iXon è raffreddata ad una temperatura di $-50^{\circ}C$, ed è fornita di una lente 50x e permette di acquisire lo spettro di emissione su tutto lo spettro dall'infrarosso all'ultravioletto.

Prima di effettuare la misura di elettroluminescenza si esegue una misura di buio, in cui si va ad acquisire il rumore di fondo della camera. Una volta acquisita l'immagine di elettroluminescenza, si procede a sottrare dall'immagine ottenuta l'immagine del buio ottenuta all'inizio.

Questa misura viene effettuata in due condizioni di funzionamento del dispositivo, una misura viene eseguita in OFF-State, mentre l'altra misura viene eseguita in ON-State. Nelle seguenti due sezioni, vengoni indicati i valori utilizzati per ottenere le due condizioni di funzionamento ed inoltre vengono esposti i risultati ottenuti durante le misure.

4.4.1 Strep-Stress con electroluminescenza in OFF-State

Per polarizzare il dispositivo in OFF-State, si procede andando ad imporre al gate una tensione positiva, per la misura si è imposto $V_g = 1V$, come nello step stress effettuato nel set di campioni precedente. Per quanto riguarda la tensione di drain, il primo step di stress viene eseguito con $V_d = 0V$, per poi aumentarla di -5V. Lo step-stress viene terminato con la rottura del dispositivo. Nel seguito vengono riportati due grafici contenenti la concatenazione della corrente di drain e della corrente di gate ottenute durante lo stress.



Figura 4.6: Concatenazione Stress OFF su D5 con $W = 100 \mu m$

Nel grafico che riporta l'andamento della corrente di drain (parte (a) della figura 4.6), si vede che la corrente parte da valori molto bassi per bassi valori della tensione di drain in quanto in questa condizione di funzionamento il dispositivo si comporta come un circuito aperto e quindi non dovrebbe permettere il passaggio di corrente perchè il canale conduttivo non è formato, quindi la concentrazione dei portatori in grado di muoversi nel reticolo cristallino al di sotto del contatto di gate è bassa e ai portatori viene fornita una bassa velocità dal campo elettrico e quindi la corrente per basse tensioni di drain è bassa. Aumentando la tensione al drain, la concentrazione dei portiatori liberi di muoversi è all'incirca costante, ma aumenta la velocità dei portatori fornita dal campo elettrico che si viene a formare tra drain e source, questo provoca un aumento della corrente che scorre nel dispositivo. Un ulteriore meccanismo che può portare all'aumento della corrente di drain nei vari step è l'effetto di canale corto, in quanto la lunghezza del canale per questi dispositivi è di $L = 1 \mu m$. Aumentando troppo la tensione di drain, aumenta anche il campo elettrico, fino ad un livello critico, chiamato campo elettrico di breakdown E_{bd} , oltre il quale avviene la rottura del dispositivo. Per il dispositivo in esame, la tensione alla quale avviene la rottura è $V_d = -130V$, dove il grafico mostra un picco della corrente per poi tornare verso lo zero, il che indica che dopo la rottura il dispositivo si comporta come un circuito aperto.

Per quanto riguarda il grafico che mostra l'andamento della corrente di gate, si vede che quest'ultima rimane nulla fino all'istante in cui il dispositivo si rompe, infatti, in quell'istante si vede un picco relativamente alto della corrente di gate per poi ritornare verso lo zero.

Nella figura 4.7 è riportato l'andamento della potenza normalizzata rispetto alla lunghezza del finger di gate (W). Dalla figura si vede che la potenza aumenta andando avanti con lo stress in quanto si ha un aumento della tensione imposta per lo stress e contemporaneamente si ha un aumento della corrente, come si può vedere dal grafico (a) della figura 4.6, e quindi si ha un aumento della potenza. La rottura del dispositivo avviene alla potenza di 2.45W/mm.

Nei grafici riportati nella figura 4.8 si può vedere l'andamento delle caratteristiche DC ottenute dopo ogni passo dello stress, per il valore massimo applicato al gate per quanto riguarda la caratteristica di uscita e per il valore massimo applicato al drain per quanto riguarda la transcaratteristica. Dal garfico della caratteristica di uscita si vede che procedendo con lo stress, si va a degradare il dispositivo, infatti, si vede che la corrente di drain che scorre nel dispositivo diminuisce ed inoltre si vede che la pendenza della curva nella



Figura 4.7: Potenza durante lo stress su D5 con $W = 100 \mu m$



Figura 4.8: (a): confronto $I_d - V_d$; (b): confronto $I_d - V_g$ su D5 con $W = 100 \mu m$

zona dell'origine diminuisce, questa diminuzione della pendenza implica un aumento della R_{on} , questo aumento è causato dal degrado del dispositivo causato dall'aumentare della tensione applicata al drain durante lo stress. Andando ad osservare il grafico della $I_d - V_g$ si vede che anche in questo caso c'è una diminuzione della corrente di drain che scorre nel dispositivo all'aumentare della tensione applicata al drain. Dallo stesso grafico si può inoltre vedere che la tensione di soglia del dispositivo si sposta verso valori più negativi rispetto al valore che la tensione di soglia assume all'inizio dello stress.



Figura 4.9: Transconduttanza su D5 con $W = 100 \mu m$

Dal grafico riportato in figura 4.9 si vede l'andamento della transconduttanza, dalle curve si vede che all'aumentare della tensione di stress applicata al drain c'è una diminuzione del valore di picco della g_m , inoltre si vede anche uno shift delle curve verso destra come si può vedere anche dalle curve che mostrano l'andamento delle $I_d - V_g$. La diminuzione del valore di picco e lo spostamento delle curve all'aumentare della tensione di stress applicata al drain sono dovuti all'aumentare di stati trappola e di difetti all'interno del diamante, aumento causato dalla tensione di stress.



Figura 4.10: (a): Diodo Gate-Source ; (b):Parallelo Diodi Gate-Source e Gate-Drain su D5 con $W = 100 \mu m$

Nella figura 4.10 è riportato l'andamento dei due diodi misurati nella caratterizzazione DC dopo ogni step dello stress. Dai due grafici si vede che durante lo stress i due diodi non mostrano particolari cambiamenti, il che significa che lo stress non va ad alterare i diodi che vengono a formarsi nelle giunzioni tra gate e drain e tra gate e source.

Partendo dalle curve ottenute nella caratterizzazione DC, dalla curva delle $I_d - V_d$ ottenuta a $V_g = -4V$ si calcola la resistenza come l'inverso della pendenza della curva nella zona dell'origine. Dalla curva delle $I_d - V_g$ ottenuta a $V_d = -24V$, si calcola la tensione di soglia imponendo come valore della corrente di drain di riferimento il valore $I_d = -2.5mA$. Andando poi a normalizzare i valori ottenuti al valore ottenuto dopo il primo step di stress, si ottiene il seguente grafico.



Figura 4.11: Correlazione tra $R_{on} \in V_{th}$ su D5 con $W = 100 \mu m$

Andando ad osservare il grafico in figura 4.11, si vede che all'aumentare della tensione di stress imposta al drain la tensione di soglia si sposta verso valori più negativi rispetto al valore iniziale con un andamento lineare. Per quanto riguarda l'andamento della R_{on} si vede che anche in questo caso l'andamento mostrato dalla curva è un andamento crescente, ma a differenza della V_{th} , per bassi valori della tensione di stress la resistenza aumenta di poco, mentre andando ad aumentare la tensione di stress, si ha un incremento più rapido della resistenza. Dal grafico si vede che le cinetiche temporali che portano all'aumento dei valori sono diversi e questo suggerisce che il meccanismo responsabile per le due variazioni sia diverso.

In questa misura è stata raccolta anche l'elettroluminescenza prodotta dal dispositivo. Il conteggio dei fotoni emessi è riportato nel grafico in fugura 4.12.



Figura 4.12: (a): Conteggio dei fotoni; (b): Conteggio dei fotoni normalizzato su D5 con $W = 100 \mu m$

Nel grafico di sinistra della figura 4.12 si vede il conteggio dei fotoni, da tale grafico si vede che per valori di tensione di stress inferiore a $V_d = -100V$ l'elettroluminescenza del dispositivo è molto bassa, andando ad aumentare la tensione di stress imposta al drain si vede che l'elettroluminescenza aumenta. Nell'ultima curva si vede un picco nel quarto punto il che indica che in quell'istante il dispositivo si è rotto. Da queste curve si vede che per bassi valori della tensione di stress le curve assumono valori relativamente bassi in quanto l'elettroluminescenza rilevata è dovuta al rumore rilevato dalla camera che non è stato rimosso andado a sottrarre alla misura la misura di buio. Nelle curve che mostrano gli ultimi step dello stress si vede che nel corso del singolo step di stress l'elettroluminescenza rilevata aumenta, questo incremento nell'emissione di fotoni può essere dovuto all'aumentare del picco del campo elettrico dovuto alla generazione di difetti all'interno del materiale oppure all'aumento della corrente di drain.

Andando a sovrapporre la foto del dispositivo con l'immagine di elettroluminescenza ricavata dalla camera iXon, si ottengono le immagini riportate nelle figure 4.13, 4.14 e 4.15. Dalla figura si vede il dispositivo con il terminale di gate nella parte bassa e il terminale di drain nella parte alta. Dalle immagini si vede che il dispositivo inizia a emettere fotoni quando la

Dalle immagini si vede che il dispositivo inizia a emettere fotoni quando la tensione di stress imposta al drain ragguinge il valore $V_d = -75V$. A questa tensione l'emissione è debole, infatti si possono vedere solamente tre punti nei finger di gate nella zona vicino al drain. Aumentando la tensione di stress



Figura 4.13: Sovrapposizione foto dispositivo ed elettroluminescenza dopo 100s di stress su D5 con $W = 100 \mu m$

si vede che l'emisisone di fotoni aumenta a causa dell'aumento della tensione di stress imposta al drain.

Dalle immagini riportate in figura 4.16 è mostrata l'elettrolumiescenza prodotta dal dispositivo all'inizio dello stress quando la tensione di stress varia tra $V_d = -95V$ e $V_d = -130V$, tenisione alla quale avviene la rottura del dispositivo. Da questa figure si vede che l'emissione di fotoni aumenta all'aumentare della tensione di stress, esattamente come accadeva nelle immagini mostrate nelle figura precedenti prese alla fine dello step di stress.

Nella figura 4.17 è riportata l'emissione di fotoni rilevati dalla camera nel momento in cui avviene la rottura del dispositivo. Dalla figura si vede che l'emissione avviene principalmente dal drain in quanto la rottura del dispositivo potrebbe avvenire per l'elevato valore del campo elettrico presente negli angoli del terminale di drain, valore del compo elettrico che supera il valore del campo elettrico critico del materiale, questo porta alla rottura del dispositivo.



Figura 4.14: Sovrapposizione foto dispositivo ed elettroluminescenza dopo 100s di stress su D5 con $W=100 \mu m$



Figura 4.15: Sovrapposizione foto dispositivo ed elettroluminescenza dopo 100s di stress su D5 con $W=100 \mu m$



Figura 4.16: Sovrapposizione foto dispositivo ed elettroluminescenza dopo 0s di stress alle tensioni comprese tra $V_d = -95V$ e $V_d = -130V$ su D5 con $W = 100 \mu m$



Figura 4.17: Sovrapposizione foto dispositivo ed elettroluminescenza dopo 30s di stress alla tensione $V_d=-130V$ su D5 con $W=100\mu m$

4.4.2 Strep-Stress con electroluminescenza in ON-State

Per polarizzare il dispositivo in ON-State, si procede andando ad imporre al gate una tensione più negativa della tensione di soglia del dispositivo, per la misura, si impone la stessa tensione che è stata utilizzata nello step-stress eseguito nel set di campioni precedentemente analizzati, infatti, si è imposto $V_g = -4V$. Per quanto riguarda la tensione di drain, il primo step di stress viene eseguito con $V_d = 0V$, per poi aumentarla con step di -5V. Lo step-stress viene terminato con la rottura del dispositivo, Nel seguito vengono riportati due grafici contenenti la concatenazione della corrente di drain e della corrente di gate ottenute durante lo stress.



Figura 4.18: Concatenazione Stress ON su F3 con $W = 100 \mu m$

Dal grafico della corrente di drain, si può vedere che, per bassi valori della tensione di drain, la corrente misurata aumenta ad ogni step, per poi, quando la tensione di drain raggiunge i -25V, la corrente inizia a stabilizzarsi e rimanere all'incirca costante per gli step successivi. La corrente cala leggermente in quanto visto l'alto valore della corrente che circola nel dispositivo, quest'ultimo si sta degradando e quindi la corrente che riesce a scorrere attraverso esso si riduce. Andando a vedere la corrente nel singolo step, si vede un aumento che è dovuto all'autoriscaldamento del dispositivo a causa dell'elevato valore della corrente che scorre nel dispositivo in ON-State. Raggiunta la tensione $V_d = -100V$, si vede che la corrente di drain mostra un picco importante per poi andare verso lo zero, il che indica che in quel momento il dispositivo si è rotto ed è diventato un circuito aperto.

Per quanto riguarda il grafico che mostra l'andamento della corrente di gate, si vede che questa è nulla durante tutta la misura, e nell'istante in cui dal grafico della corrente di drain mostra la rottura del dispositivo, si vede un picco anche nella corrente di gate, corrente che dopo il picco ritorna verso lo zero.



Figura 4.19: Potenza durante lo stress su F3 con $W = 100 \mu m$

Nella figura 4.19 è riportato l'andamento della potenza normalizzata rispetto alla lunghezza del finger di gate (W). Dalla figura si vede che la potenza aumenta andando avanti con lo stress in quanto si ha un aumento della tensione imposta per lo stress e contemporaneamente si ha un aumento della corrente, come si può vedere dal grafico (a) della figura 4.18, e quindi si ha un aumento della potenza. Dal grafico si può inoltre vedere che nel momento della rottura la potenza per mm nel dispositivo raggiunge valori elevati, infatti si raggiunge un valore di 25.7W/mm.

Nella figura 4.20 si vede l'andamento delle caratteristiche DC. Per quanto riguarda il grafico che riporta l'andamento delle $I_d - V_d$, come nello stress precedente, si vede che all'aumentare della tensione di stress il dispositivo degrada andando a ridurre la corrente che riesce a scorrere. Dallo stesso grafico si può vedere che anche la resistenza ricavata dalle curve di $I_d - V_d$ peggiora in quanto la pendenza delle curve diminuisce all'aumentare della tensione di drain imposta per lo stress. Andando ad osservare il grafico che riporta l'andamento della transcaratteristica, si vede che anche in questo caso il dispositivo degrada andando a ridurre la massima corrente che il dispositivo è in grado di far scorrere, ed inoltre, si vede uno shift della tensione di soglia verso valori più negativi rispetto al valore iniziale.

Nella figura 4.21 è riportato l'andamento della transconduttanza. Dal grafico



Figura 4.20: (a): confronto $I_d - V_d$; (b): confronto $I_d - V_g$ su F3 con $W = 100 \mu m$



Figura 4.21: Transconduttanza su F3 con $W = 100 \mu m$

si vede che il valore di picco cala all'aumentare della tensione di stress applicata al drain, inoltre si vede che le curve si spostano verso destra. In questa misura dal grafico della transconduttanza si nota un'altra particolarità, infatti si vede che il valore di partenza delle curve all'aumentare della tensione di stress diminuisce. Tale comportamento delle curve è dovuto all'aumentare di difetti e stati trappola all'interno del materiale a causa della tensione di stress imposta al drain.

Quando il dispositivo si rompe, questo diventa un circuito aperto e questo implica che la corrente che è in grado di scorrere nel dispositivo è nulla, come si può vedere da entrambi i grafici riportati nella figura 4.20.



Figura 4.22: (a): Diodo Gate-Source; (b): Parallelo Diodi Gate-Source e Gate-Drain su F3 con $W = 100 \mu m$

Nella figura 4.22 è riportato l'andamento dei diodi misurati nella caratterizzaizone dopo ogni step di stress. Nei due grafici si vede che i due diodi non presentano nessun andamento particolare, si nota solamente che nella caratterizzazione eseguita dopo lo step di stress in cui il dispositivo si è rotto, le curve che rappresentano l'andamento della corrente che scorre nei diodi assumono un andamento in cui si vede che per tensioni di gate più negative della tensione di soglia si ha una corrente significativa che scorre nei due diodi, mentre per tensioni di gate positive la corrente misurata nei due diodi è il rumore interno del parameter utilizzato per la misura.

Partendo dalle curve ottenute nella caratterizzazione DC, dalla curva delle $I_d - V_d$ ottenuta a $V_g = -4V$ si calcola la resistenza come l'inverso della pendenza della curva nella zona dell'origine. Dalla curva delle $I_d - V_g$ ottenuta a $V_d = -24V$, si calcola la tensione di soglia imponendo come valore della corrente di drain di riferimento il valore $I_d = -2.5mA$. Andando poi a normalizzare i valori ottenuti al valore ottenuto dopo il primo step di stress, si ottiene il seguente grafico.

Andando ad osservare il grafico riportato in figura 4.23, si vede che per bassi valori della tensione di stress imposta al drain la R_{on} rimane stabile per poi aumentare andando ad aumentare la tensione di stress. Per quanto riguarda la tensione di soglia si vede che inizialmente si sposta verso valori in modulo minori rispetto al valore iniziale per poi alla stessa tensione di stress alla quale la R_{on} comincia a salire, anche la V_{th} mostra un andamento crescente. Da tale grafico si vede che dalla tensione di stress $V_d = -30V$



Figura 4.23: Correlazione tra $R_{on} \in V_{th}$ su F3 con $W = 100 \mu m$

imposta al drain in poi entrambe le curve mostrano un andamento crescente il che implica che il meccanismo di degrado che provoca l'aumento della R_{on} e lo spostamento della tensione di soglia è lo stesso. Nello specifico tale meccanismo si può ricondurre all'aumento di difetti e di stati trappola generati dall'elevato valore della tensione di stress imposta al drain e dall'elevato valore della corrente che circola nel dispositivo.

In questa misura è stata raccolta anche l'elettroluminescenza prodotta dal dispositivo. Il conteggio dei fotoni emessi è riportato nel seguente grafico.



Figura 4.24: (a): Conteggio dei fotoni; (b): Conteggio dei fotoni normalizzato su F3 con $W=100 \mu m$

Nel grafico di sinistra della figura 4.24 si vede il conteggio dei fotoni, da

tale grafico si vede che per valori di tensione di stress bassi l'elettroluminescenza misurata è bassa in quanto il campo elettrico generato tra drain e source ha un valore basso e quindi i portatori che formano il canale riescono a guadagnare una bassa energia cinetica. Questo implica che la generazione dell'elettroluminescenza come radiazione di frenamento è bassa, infatti i valori raccolti sono il rumore residuo ottenuto dalla sottrazione tra la misura durante lo stress e la misura di buio eseguita all'inizio della misura. Andando ad aumentare il valore della tensione di stress, aumenta anche il campo elettrico che si forma tra drain e source e quindi aumenta l'elettroluminescenza da radiazione di frenamento. Nel grafico di destra si vede l'andamento dell'elettroluminescenza normalizzato al valore finale, da tale grafico si vede che nel corso del singolo step di stress il valore dell'intensità misurata diminuisce. La diminuzione di elettroluminescenza nel singolo step è dovuta all'autoriscaldamento del dispositivo che va a ridurre il libero cammino medio, visto che la corrente di drain aumenta. Considerando l'andamento dell'ampiezza del transitorio descritto dalle curve si vede che all'aumentare della tensione di stress, tale ampiezza diminuisce. L'ampiezza del transitorio diminuisce a causa dell'aumento di livelli profondi che provoca un aumento del tasso di scattering e riduce l'effetto dello scattering termico.



Figura 4.25: Sovrapposizione foto dispositivo ed elettroluminescenza dopo 0s di stress su F3 con $W = 100 \mu m$



Figura 4.26: Sovrapposizione foto dispositivo ed elettroluminescenza dopo 0s di stress su F3 con $W = 100 \mu m$

Andando a sovrapporre la foto del dispositivo con l'immagine di elettroluminescenza ricavata dalla camera *iXon*, si ottengono le figure riportate nelle figure 4.25 e 4.26. Da queste immagini si vede che i dispositivo inizia e emettere fotoni dalla tensione di stress $V_d = -25V$. Con il dispositivo in ON-State si vede che il dispositivo inizia a emettere a tensioni molto più basse rispetto al dispositivo polarizzato in OFF-State in quanto in ON-State il numero di portatori in grado di emettere fotoni con il meccanismo della radiazione di frenamento è molto maggiore rispetto alla condizione di OFF-State. Andando ad aumentare la tensione di stress imposta la drain si vede che l'emissione di fotoni aumenta a causa dell'aumentare della tensione di stress imposta al drain. Nell'immagine presa nel primo istante dello stress con $V_d = -100V$ si vede che c'è una emissione importante nei due finger di gate, tale emissione è causata dalla rottura del dispositivo. L'aumento dell'emissione è dovuta all'aumento dei portatori che circolano nel dispositivo, infatti dal grafico 4.18 si vede un picco nella corrente di drain. Il dispositivo in questa misura si è rotto a causa dell'elevato valore di corrente che circola nel transistor e quindi l'elevato valore della potenza che il dispositivo si trova a gestire.

Nelle immagini riportate nelle figure 4.27 e 4.28 si vede l'elettroluminescenza rilevata dopo 110s di stress. Da queste immagini si può vedere



Figura 4.27: Sovrapposizione foto dispositivo ed elettroluminescenza dopo 110s di stress su F3 con $W=100 \mu m$



Figura 4.28: Sovrapposizione foto dispositivo ed elettroluminescenza dopo 110s di stress su F3 con $W=100 \mu m$

che l'emissioni di fotoni inizia a $V_d = -25V$, ma andando a confrontare le immagini tensione per tensione si vede che l'emissione di fotoni diminuisce all'aumentare del tempo di stress, come si vede anche dai grafici riportati in figura 4.24 in quanto in condizioni di ON-State l'elevato valore della corrente che circola nel dispositivo porta il transistor all'autoriscaldamento e questo va a ridurre il libero cammino medio che i portatori riescono a compiere e quindi si vede una diminuzione dei fotoni emessi. Nell'immagine che riporta l'elettroluminescenza alla tensione di stress $V_d = -100V$ si vede che l'elettroluminescenza è molto ridotta in quanto con la rottura del dispositivo si vanno a rompere i finger di gate e quindi il passaggio di portatori non può più avvenire e questo porta a ridurre drasticamente l'emissioni di fotoni. Un numero limitato di fotoni viene emesso nella zona del terminale di drain probabilmente perchè essendo rotto il campione, la corrente non scorre più nel canale del transistor ma in cammini parassiti tra il contatto di drain e i terminali di source.

4.5 Strep-Stress con elettroluminescenza con EL-bell

Questo tipo di misura consiste nell'eseguire uno step-stress come quelli descritti nella sezione precedente, cioè mantenendo costante la tensione di gate ed andando a variare la tensione di drain e con durata di ogni step di stress di 120 secondi (2 min), con la differenza che nella caratterizzazione post stress, oltre alla caratterrizzazione DC completa viene eseguita anche una misura chiamata campana di elettroluminescenza (electroluminescence bell, EL-Bell). Questo tipo di misura consiste nell'andare a vedere il numero di fotoni emessi dal dispositivo facendo uno sweep della tensione applicata al gate per diversi valori della tensione di drain. La misura è stata effettuata con l'utilizzo della camera iXon. Per questa misura, si è utilizata la lente 50x per la camera, poi si è impostato un valore pari a 200 per il guadagno dell'elettronica che gestisce l'acquisizione, tale valore varia in una scale tra 1 e 255, mentre per il tempo di esposizione è stato impostato un valore di 60 secondi, infine, come durata di ogni singolo step di tensione di gate si è impostato un valore di 65 secondi. Lo sweep della tensione di gate è fatto con uno step di 0.5V ed ha come valore di inizio $V_g = 1V$ e come valore finale $V_g = -4.5V$, mentre per quanto riguarda i valori della tensione di drain ai quali eseguire lo sweep al gate si è usato un passo di Vstep = -3V, con tensione iniziale di $V_d = 0V$ e tensione finale di $V_d = -24V$.

Questa misura viene effettuata in due condizioni di funzionamento del dispositivo, una misura viene eseguita in OFF-State, mentre l'altra misura viene eseguita in ON-State. Nelle seguenti due sezioni, vengono indicati i valori utilizzati per ottenere le due condizioni di funzionamento ed inoltre vengono esposti i risultati ottenuti durante le misure.

4.5.1 Strep-Stress con elettroluminescenza con EL-bell in OFF-State

Per polarizzare il dispositivo in OFF-State, si procede andando ad imporre al gate una tensione positiva, per la misura si è imposto $V_g = 1V$, come nello step stress effettuato nel primo set di campioni e nello step stress descritto nella sezione 4.4.1. Per quanto riguarda la tensione di drain, il primo step di stress viene eseguito con $V_d = 0V$, per poi aumentarla di $V_{d-step} = -5V$. Lo step-stress viene terminato con la rottura del dispositivo. Nel seguito vengono riportati due grafici contenenti la concatenazione della corrente di drain e della corrente di gate ottenute durante lo stress.



Figura 4.29: Concatenazione Stress OFF su D3 con $W = 25 \mu m$

Nel grafico che riporta l'andamento della corrente di drain, si vede che la corrente parte da valori molto bassi nei primi step dello stress in quanto in questa condizione di funzionamento il dispositivo si comporta come un circuito aperto e quindi non dovrebbe permettere il passaggio di corrente perchè il canale conduttivo non è formato, infatti, la concentrazione dei portatori in grado di muoversi nel reticolo cristallino al di sotto del contatto di gate è bassa e ai portatori non viene fornita una elevata velocità dal campo elettrico e quindi la corrente nei primi step dello stress è bassa. Aumentando la tensione al drain, la concentrazione dei portatori liberi di muoversi è all'incirca costante, ma aumenta la velocità di tali portatori fornita dal campo elettrico che si viene a formare tra drain e source, questo provoca un aumento della corrente che scorre nel dispositivo. Un altro meccanismo che può portare un aumento della corrente per elevati valori della tensione di drain sono gli effetti di canale corto. Tali effetti si fanno sentire in quanto aumentando la tensione di stress, aumenta il campo elettrico tra drain e source e questo insieme alla lunghezza del canale, $L = 1 \mu m$, può portare ad un aumento della corrente di drain misurata durante lo stress. Aumentando troppo la tensione di drain, aumenta anche il campo elettrico, fino ad un livello critico, chiamato campo elettrico di breakdown E_{bd} , oltre il quale avviene la rottura del dispositivo. Per il dispositivo in esame, la tensione alla quale avviene la rottura è di -115V, dove il due grafici mostrano un picco della corrente per poi tornare verso lo zero, il che indica che dopo la rottura il dispositivo si comporta come un circuito aperto.

Per quanto riguarda il grafico che mostra l'andamento della corrente di gate, si vede che quest'ultima rimane mediamente nulla fino all'istante in cui il dispositivo si rompe, infatti, in quell'istante si vede un picco relativamente elevato della corrente per poi ritornare verso lo zero, l'andamento della curva mostrato per i primi step è la dovuto al rumore interno del parameter con il quale è stata eseguita la misura.



Figura 4.30: Potenza durante lo stress su D3 con $W=25 \mu m$

Nella figura 4.30 è riportato l'andamento della potenza normalizzata ri-

spetto alla lunghezza del finger di gate (W). Dalla figura si vede che la potenza aumenta andando avanti con lo stress in quanto si ha un aumento della tensione imposta per lo stress e contemporaneamente si ha un aumento della corrente, come si può vedere dal grafico (a) della figura 4.29, e quindi si ha un aumento della potenza. Il dispositivo si è rotto al livello d potenza di 1W/mm.



Figura 4.31: (a): confronto $I_d - V_d$; (b): confronto $I_d - V_g$ su D3 con $W = 25\mu m$



Figura 4.32: Transconduttanza su D3 con $W = 25 \mu m$

Nella figura 4.31 è riportato l'andamento delle curve che descrivono la caratteristica di uscita e la transcaratteristica ottenute dalla caratterizzazione DC dopo ogni step di stress. Dal grafico delle $I_d - V_d$, si vede che il dispositivo degrada, infatti, inizalmente la corrente in grado di scorrere nel dispositivo diminuisce, poi all'aumentare della tensione di drain, si nota un aumento della corrente di drain, infine, aumentando ulteriormente la tensione di drain la corrente ricomincia a scendere fino alla rottura del dispositivo, dove si vede che la curva rimane costante a zero. Per quanto riguarda il grafico della $I_d - V_q$, si vede che il dispositivo degrada in quanto si ha una diminuzione della corrente in grado di scorrere nel dispositivo. Anche per questa misura, si può notare che inizialmente la curva si abbassa e si ha uno shift verso destra, andando però ad aumentare la tensione di drain durante lo stress, si ha che la curva continua a ridurre la corrente massima, ma si nota un leggero shift verso sinistra. Andando ad aumentare ulteriormente la tensione di drain nello stress, dalla caratterizzazione si vede che la corrente massima continua a diminuire e si vede che si ha uno shift verso destra. Questo significa che la tensione di soglia inizialmente si sposta verso valori più negativi rispetto al valore iniziale per poi ritornare leggermente verso il valore ottenuto prima dell'inizio dello stress, infine, la tensione di soglia ritorna ad allontanarsi dal valore iniziale verso valori più negativi. Queste variazioni della tensione di soglia si hanno fino alla caratterizzazione DC effettuata prima dello step di stress nel quale è avvenuta la rottura del dispositivo in quanto una volta che il dispositivo si è rotto, la curva rimane costante a zero, in quanto dopo la rottura il dispositivo diventa un circuito aperto.

Nella figura 4.32 è riportato l'andamento della transconduttanza ricavata dalla caratterizzazione DC effettuata dopo ogni step di stress. Dal grafico si vede che all'aumentare della tensione di stress imposta al drain, c'è una diminuzione del valore di picco e uno shift delle curve verso destra. La riduzione del valore di picco e lo shift delle curve è causato dall'aumento di difetti e di livelli profondi che vengono a formarsi all'interno del materiale a cuasa della tensione di stress imposta al terminale di drain.

Nella figura 4.33 è riportato l'andamento dei diodi misurati durante la caratterizzazione DC dopo ogni step dello stress. Dai due grafici si vede che i diodi all'aumentare della tensione di stress imposta al drain non mostrano significative variazioni, questo significa che la tensione di stress non va a modificare le giunzioni dove vengono a formarsi i diodi.

Partendo dalle curve ottenute nella caratterizzazione DC, dalla curva delle $I_d - V_d$ ottenuta a $V_g = -4V$ si calcola la resistenza come l'inverso della pendenza della curva nella zona dell'origine. Dalla curva delle $I_d - V_g$ ottenuta a $V_d = -24V$, si calcola la tensione di soglia imponendo come valore della corrente di drain di riferimento il valore $I_d = -1mA$. Andando poi a



Figura 4.33: (a): Diodo Gate-Source; (b): Parallelo Diodi Gate-Source e Gate-Drain su D3 con $W = 25 \mu m$

normalizzare i valori ottenuti al valore ottenuto dopo il primo step di stress, si ottiene il grafico riportato in figura 4.34.



Figura 4.34: Correlazione tra $R_{on} \in V_{th}$ su D3 con $W = 25 \mu m$

Andando ad osservare il grafico in figura 4.34, si vede che all'aumentare della tensione di stress imposta al drain la tensione di soglia si sposta verso valori più negativi rispetto al valore iniziale con un andamento a scalini. Per quanto riguarda l'andamento della R_{on} si vede che per tensioni di stress fino a $V_d = -50V$ si ha un andamento crescente, andando ad aumentare la tensione di stress si vede che la resistenza cala tendendo a ritornare verso il valore iniziale, infine dalla tensione di stress $V_d = -65V$ la R_{on} ha un andamento monotono crescente tranne nell'ultimo step dello stress in cui la resistenza cala molto rapidamente. Tale comportamento della R_{on} è compatibile con le curve riportate nel grafico di sinistra riportato in figura 4.31 nel quale si vede che inizialmente la pendenza delle curve diminuisce, per poi aumentare ed infine continuare la discesa fino all'ultimo step dello stress prima della rottura del dispositivo nel quale si ha un nuovo aumento della pendenza e quindi una diminuzione del valore della resistenza. I due andamenti della curva sono diversi, questo implica che il meccanismo che porta all'aumento della resistenza e lo spostamento della tensione di soglia è diverso. Probabilmente il meccanismo in esame è la generazione di livelli profondi in quantità e con un andamento temporale diverso oppure la generazione avviene in regioni diverse del dispositivo.

Nei seguenti due grafici è riportato l'andamento delle campane di elettroluminescenza all'avanzare dello stress, i valori della tensione di drain dei due grafici è stata scelta perchè facilmente confrontabile con i risultati del constant stress riportati nella sezione seguente.



Figura 4.35: Campane di elettroluminescenza su D3 con $W = 25 \mu m$

Dai due grafici si può vedere che il dispositivo comincia ad emettere fotoni una volta che la tensione di gate supera il valore della tensione di soglia. Andando avanti con lo stress si vede che il numero di fotoni emessi si riduce, Andando a spostare il picco di elettroluminescenza verso tensioni di gate più positive per il grafico con $V_d = -15V$ e verso tensioni più negative per quanto riguarda il grafico con $V_d = -24V$. L'intensità emessa dal dispositivo è proporzionale alla corrente e al campo elettrico che accellera i portatori nel canale. Per elevati valori della tensione di drain entra in gioco anche lo scattering elettrone-elettrone, che va a ridurre ulteriormente il numero di foroni emessi dal dispositivo. Nel caso delle campane di elettroluminescenza riportate nella figura 4.35 si vede che nelle curve si riduce il valore del massimo in quanto aumentando la tensione di stress applicata al drain diminuisce lo scattering elettrone-elettrone perchè cala la corrente di drain come si può vedere dalla caratterizzazione DC. All'aumentare della tensione di stress si ha un aumento dello scattering elettrone-difetto in quanto con lo stress si va ad aumentare la concentrazione di difetti e questo provoca la diminuzione dell'elettroluminescenza misurata con le campane.



Figura 4.36: (a): Correlazione Id-EL (b): Correlazione Id-EL normalizzata su D3 con $W = 25 \mu m$ calcolata a $V_g = -4V$ e $V_d = -24V$

Nei grafici riportati in figura 4.36 è riportata la correlazione tra la corrente di drain misurata durante la caratterizzazione DC e l'elettroluminescenza misurata durante le campane di elettroluminescenza, figura (a), mentre nella figura (b) è riportata la versione normalizzata al valore ottenuto nella prima misura. Nei grafici si vede che non c'è nessuna correlazione tra la variazione percentuale delle due quantità, questo implica che la diminuzione dell'emissione di fotoni non è legata alla diminuzione della corrente di drain, ma è riconducibile all'aumento dello scattering elettrone-difetto.

4.5.2 Strep-Stress con elettroluminescenza con EL-bell in ON-State

Per polarizzare il dispositivo in ON-State, si procede andando ad imporre al gate una tensione più negativa della tensione di soglia del dispositivo, per la misura si è impostato $V_g = -4V$, come negli step-stress in ON-State descritti in precedenza. Per quanto riguarda la tensione di drain, il primo step di stress viene eseguito con $V_d = 0V$, per poi aumentarla di $V_d = -5V$. Lo step-stress viene terminato con la rottura del dispositivo, Nel seguito vengono riportati due grafici contenenti la concatenazione della corrente di drain e della corrente di gate ottenute durante lo stress.



Figura 4.37: Concatenazione Stress ON su E4 con $W = 100 \mu m$

Dal grafico della corrente di drain, si può vedere che per bassi valori della tensione di drain, la corrente misurata aumenta ad ogni step, per poi, quando la tensione di drain raggiunge i -15V, la corrente di drain si stabilizza e rimane all'incirca costante per tutti gli step successivi. Nel singolo step si vede che la corrente aumenta in quanto c'è l'autoriscaldamento del campione dovuto all'elevato valore della corrente che circola nel dispositivo. Raggiunta la tensione $V_d = -95V$, si vede che la corrente di drain mostra un picco importante per poi andare verso lo zero, il che indica che in quel momento il dispositivo si è rotto ed è diventato un circuito aperto.

Per quanto riguarda il grafico che mostra l'andamento della corrente di gate, si vede che questa è mediamente nulla durante tutta la misura infatti dalla curva si vede il rumore interno del parameter con il quale viene eseguita la misura. Nell'istante in cui dal grafico della corrente di drain si vede che il dispositivo si rompe, si vede un picco anche nella corrente di gate, corrente che dopo il picco ritorna stabile verso lo zero.

Nella figura 4.38 è riportato l'andamento della potenza normalizzata rispetto alla lunghezza del finger di gate (W). Dalla figura si vede che la potenza aumenta andando avanti con lo stress in quanto si ha un aumento della



Figura 4.38: Potenza durante lo stress su E4 con $W = 100 \mu m$

tensione imposta per lo stress e contemporaneamente si ha un aumento della corrente, come si può vedere dal grafico (a) della figura 4.37, e quindi si ha un aumento della potenza. Dal grafico si può inoltre vedere che la potenza per mm nel momento della rottura anche in questo caso è elevata, infatti si raggiunge il valore di 15.5W/mm.



Figura 4.39: (a): confronto $I_d - V_d$; (b): confronto $I_d - V_g$ su E4 con $W = 100 \mu m$

Nella figura 4.39 è riportato l'andamento delle curve che descrivono la caratteristica di uscita e la transcaratteristica ottenute dalla caratterizzazio-



Figura 4.40: Transconduttanza su E4 con $W = 100 \mu m$

ne DC dopo ogni step di stress. Nel grafico che riporta l'andamento delle $I_d - V_d$, si vede che all'aumentare della tensione di drain il dispositivo degrada in quanto la corrente massima che riesce a circolare nel dispositivo diminuisce, inoltre, si vede che la pendenza della curva va diminuendo, il che implica che la resistenza del dispositivo aumenta all'avanzare della misura. Andando a vedere il grafico della $I_d - V_g$, si vede anche in questo caso che il dispositivo degrada in quanto la massima corrente che riesce a circolare nel dispositivo diminuisce all'avanzare della misura. Dallo stesso grafico si può vedere anche che le curve mostrano uno shift verso destra, il che implica che la tensione di soglia del dispositivo si sposta verso valori più negativi rispetto al valore che la tensione di soglia assume all'inizio dello stress.

Nella figura 4.40 è riportato l'andamento della transconduttanza ottenuta nella caratterizzazione DC effettuata dopo ogni step di stress. Dal grafico si vede che il valore di picco diminuisce all'aumentare della tensione di stress imposta al drain, inoltre si vede che le curve all'aumentare della tensione di stress mostrano uno shift verso destra. La diminuzione del valore di picco e lo shift sono dovuti all'aumentare della concentrazione di difetti e di stati trappola all'interno del materiale.

Nella figura 4.41 è riportato l'andamento dei diodi misurati nella caratterizzazione DC eseguita dopo ogni step dello stress. Dalle due figure si vede che i diodi non mostrano un particolare andamento tranne nella curva che mostra l'andamento della corrente nel diodo dopo lo step di stress in cui il dispositivo si è rotto. Dalla curva dopo l'ultimo step si vede che per valori della tensione di gate più negativi della tensione di soglia del dispostivo la corrente che scorre nel diodo assume valori significativi, mentre per tensioni



Figura 4.41: (a): Diodo Gate-Source; (b): Parallelo Diodi Gate-Source e Gate-Drain su E4 con $W = 100 \mu m$

di gate positive la corrente misurata è il rumore interno del parameter utilizzato per la misura.

Partendo dalle curve ottenute nella caratterizzazione DC, dalla curva delle $I_d - V_d$ ottenuta a $V_g = -4V$ si calcola la resistenza come l'inverso della pendenza della curva nella zona dell'origine. Dalla curva delle $I_d - V_g$ ottenuta a $V_d = -24V$, si calcola la tensione di soglia imponendo come valore della corrente di drain di riferimento il valore $I_d = -2.5mA$. Andando poi a normalizzare i valori ottenuti al valore ottenuto dopo il primo step di stress, si ottiene il seguente grafico.



Figura 4.42: Correlazione tra $R_{on} \in V_{th}$ su E4 con $W = 100 \mu m$

Andando ad osservare il grafico in figura 4.42, si vede che all'aumentare della tensione di stress imposta al drain la tensione di soglia si sposta verso valori più negativi rispetto al valore iniziale con un andamento lineare. Per quanto riguarda l'andamento della R_{on} si vede che inizialmente la variazione è ridotta, per poi aumentando la tensione di stress aumentare con decisione. Dalle due curve si vede che la cinetica è diversa, questo implica che i meccanismi che generano l'aumento della resistenza e lo spostamento della tensione di soglia sono diversi. Probabilmente l'effetto da considerare è l'aumento della concentrazione di difetti e di stati trappola in regioni diverse del dispositivo.

Nei seguenti due grafici è riportato l'andamento delle campane di elettroluminescenza all'avanzare dello stress, i valori della tensione di drain per i due grafici è stata scelta perchè facilmente confrontabile con i risultati del constant stress riportata nella sezione seguente.



Figura 4.43: Campane di elettroluminescenza su E4 con $W = 100 \mu m$

Dai due grafici si può vedere che il dispositivo comincia ad emettere fotoni una volta che la tensione di gate supera il valore della tensione di soglia. Andando avanti con lo stress si vede che il numero di fotoni emessi si riduce, mantenedo però il picco di emissione alla stessa tensione di gate per il grafico con la $V_d = -15V$ mentre per il grafico con $V_d = -24V$ il picco di emissione si sposta verso sinistra. Come per lo stress in OFF-State, anche in questo caso la curva che rappresenta il conteggio dei fotoni cala in quanto all'aumentare della tensione di stress imposta al drain c'è un aumento dello scattering elettrone-difetto che fa in modo che il numero di fotoni che vengono emessi dal dispositivo diminuisce, andando quindi ad abbassare le curve all'aumentare della tensione di stress imposta al drain. Un altro effetto che può provocare la diminuzione delle campane di elettroluminescenza è il calo della corrente di drain, ma in questo caso è più probabile che la diminuzione avvenga per l'aumento dello scattering elettrone-difetto in quanto il calo della corrente di drain è molto minore del calo dell'elettroluminescenza. Per quanto riguarda il grafico che riporta le campane con $V_d = -15$, non è riportata la campana dopo lo stress con ($V_g = -4; V_d = -95$), in quanto risulta avere valori elevati e non compatibili con l'andamento delle altre curve. Tale comportamento non in linea con le altre curve è riscontrabile anche nelle campane estrapolate per $V_d = -24V$. Tale comportamento deriva da fatto che il dispositivo si è rotto alla fine dello step di stress con $V_d = -95V$ e la rottura ha provocato un aumento del numero di fotoni emessi molto elevato, questo produce delle curve che non sono compatibili con le curve ottenute nelle misure precedenti oppure con la misura dopo la rottura del dispositivo, curva nella quale l'emissione di fotoni è nulla.



Figura 4.44: (a): Correlazione Id-EL (b): Correlazione Id-EL normalizzata su E4 con $W = 100 \mu m$ calcolata a $V_g = -4V$ e $V_d = -24V$

Nei grafici riportati in figura 4.44 è riportata la correlazione tra la corrente di drain misurata durante la caratterizzazione DC e l'elettroluminescenza misurata durante le campane di elettroluminescenza, figura (a), mentre nella figura (b) è riportata la versione normalizzata al valore ottenuto nella prima misura. L'andamento della curva nella figura (a) suggerisce che ci possa essere una correlazione tra la diminuzione della corrente e la diminuzione dell'emissione di fotoni, ma andando a vedere il grafico della figura (b) si vede che le variazioni percentuali tra le due quantità sono diverse e questo implica che non c'è correlazione tra le due quantità e quindi la riduzione dell'elettroluminescenza è è dovuta all'aumentare dello scattering elettrone-difetto.

4.6 Constant Stress

Con questa misura viene studiato il degrado del campione andando a matenere il dispositivo polarizzato in una determinata condizione di funzionamento, in questo caso ON-State, ed andando a variare la durata del tempo di stress, partendo con stress da 1 minuto, per poi seguire una crescita del tempo logaritmica, cioè seguendo un andamento 1, 3, 5. La durata dello stress è espressa come numero cumulativo dei minuti raggiunti, cioè il primo step è di 1 minuto, il secondo step viene chiamato 3 minuti, ma ha durata effettiva di 2 minuti, e cosi via fino a raggiungere con l'ultimo step un totale di 30000 minuti, cioè 500 ore.

Dopo ogni step di stress viene eeguita una caratterizzazione per vedere il degrado del campione dopo essere stato accesso per un certo periodo di tempo. Per la caratterizzazione, viene seguito un procedimento particolare, diverso dai procedimenti seguiti negli stress precedenti, infatti, si inizia con una caratterizzazione DC completa (caratteristiche di uscita, $I_d - V_g$, Diodi), eseguita la misura, si attende 1 minuto, per poi ripetere la caratterizzazione. Eseguita la misura si attendono due minuti per ripetere la misura, in seguito si attendono altri 2 minuti e si ripete la caratterizzazione, infine, si attendono altri 5 minuti per eseguire una nuova caratterizzazione DC completa. Quindi, vengono effettuate cinque caratterizzazioni DC complete, la prima subito dopo la fine dello stress, la seconda dopo 1 minuto, la terza dopo 3 minuti totali, la quarta dopo 5 minuti totali ed infine la quinta misura viene effettuata dopo un totale di 10 minuti dalla fine dello step di stress.

Terminato il blocco di misura riguardante la caratterizzazione DC, si attendono 5 minuti e poi inizia il blocco delle $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide. Per quanto riguarda questo blocco, si procede andando ad eseguire la misura esattamente allo stesso modo e con gli stessi parametri descritti nel capitolo precedente, quindi ci sono inizialmente 100 secondi di filling durante i quali viene intrappolata la carica, seguiti da altri 100 secondi di recovery durante i quali la carica viene rimossa. Per iniziare la misura, si esegue la misura con tensioni ($V_g = 0; V_d = 0$) che verrà utilizzata come riferimento per le variazioni ottenute con le misure successive. Eseguita la misura di riferimento si procede ad eseguire le misure con il dispositivo in ON, infatti, vengono svolte le seguenti Fast $I_d - V_g$ Ron, nell'ordine in cui sono riportate, ($V_g = -4; V_d = -5$), ($V_g = -4; V_d = -10$), ($V_g = -4; V_d = -15$), ($V_g = -1; V_d = -5$), ($V_g = -1; V_d = -10$), ($V_g = -1; V_d = -15$). Una volta eseguite le misure in ON, si passa alle misure in SEMI-ON, cioè si eseguono le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide alle seguenti tensioni di filling, nell'ordine in cui sono riportate, $(V_g = 0; V_d = -5)$, $(V_g = 0; V_d = -10)$, $(V_g = 0; V_d = -15)$. Infine, vengono eseguite le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide con il dispositivo in OFF, quindi le misure vengono eseguite alle seguenti tensioni di filling, eseguite nell'ordine in cui sono riportate, $(V_g = 1; V_d = -5)$, $(V_g = 1; V_d = -10)$, $(V_g = 1; V_d = -15)$. Terminate le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide, prima di passare alla misura successiva, si attendono 5 minuti.

L'ultima misura effetuata nella caratterizzazione post stress, è la campana di elettroluminescenza, tale misura viene effettuata con la camera iXon, sulla quale è stata montata una lente 50x, i parametri impostati per la misura sono i seguenti, come guadagno della camera è stato impostato il valore di 200, come tempo di esposizione è ststo impostato 60 secondi, mentre il tempo della misura per ogni singolo valore della tensione di gate è di 65 secondi. Le tensioni impostate per la misura sono simili a quelle utilizzate negli step-stress, infatti, per lo sweep della tensione di gate la tensione di partenza è $V_{gstart} = 1V$ e la tensione finale è $V_{gstop} = -4.5V$, con uno step di $V_{gstep} = -0.5V$, per quanto riguarda la tensione di gate viene fatto per $V_d = -15V$, mentre l'altro sweep della tensione di gate viene eseguito per $V_d = -24V$.

Una volta terminate tutte e tre le misure che compongono la caratterizzazione DC post stress, si ricomincia subito un nuovo step dello stress, mantenendo invariate la tensione di drain e quella di gate, e andando ad aumentare la durata temporale dello step. Per eseguire la misura il dispositivo viene polarizzato in ON, con una tensione al drain non troppo elevata per impedire che durante la misura il dispositivo si possa rompere, in quanto si vuole vedere il degrado del dispositivo e non il meccanismo di rottura, quindi le tensioni utilizzate per la misura sono $V_q = -4V$ e $V_d = -25V$.

Nell'immagine 4.45 è riportato l'andamento concatenato della corrente di drain e di quella di gate. Dal grafico che riporta l'andamento della corrente di drain, si vede che per gli step di durata ridotta, la corrente rimane stabile, mentre andando ad aumentare la durata del tempo di stress, si nota che la corrente che riesce a circolare nel dispositivo diminuisce a causa del degrado del dispositivo in esame. Andando a vedere la corrente nel singolo step, si vede che c'è un aunmento della corrente che circola nel dispositivo. Per gli ultimi step, quelli temporalmente più lunghi, si vede che inizialmente la corrente rimane costante per poi al passare del tempo andare a diminuire.



Figura 4.45: Concatenazione Constant Stress ON su E2 con $W = 25 \mu m$

Per quanto riguarda il grafico che riporta l'andamento della corrente di gate, la curva che viene mostrata è il rumore che viene generato dallo strumento con il quale viene eseguita la misura, cioè l'Agilent E5263A.



Figura 4.46: Potenza durante lo stress su E2 con $W = 25 \mu m$

Nella figura 4.46 è riportato l'andamento della potenza normalizzata rispetto alla lunghezza del finger di gate (W). Dalla figura si vede che la potenza diminuisce andando avanti con lo stress in quanto si ha la tensione imposta per lo stress rimane la stessa per tutti gli step e contemporaneamente si ha una diminuzione della corrente, come si può vedere dal grafico (a) della figura 4.45, e quindi si ha un diminuzione della potenza. Dal grafico si può inoltre vedere che la potenza per mm all'inizio della misura raggiunge il valore di 5.3W/mm per poi andare a diminuire fino al valore di 16.89mW/mm a causa del degrado del dispositivo durante lo stress che fa diminuire la corrente di drain.

Le prime misure effettuata nella caratterizzazione DC post stress sono le caratteristiche di uscita, le transcaratteristiche e i diodi, nel seguito sono riportati i risultati ottenuti da tale misura.



Figura 4.47: $I_d - V_d$ dopo lo step di stress di 10 minuti su E2 con $W = 25 \mu m$

Nel grafico riportato in figura 4.47 è riportato l'andamento delle $I_d - V_d$ eseguite nei cinque istanti temporali. Da tale grafico si vede che andando ad aumentare il tempo di attesa tra la fine dello step di stress e la caratterizzazione DC c'è una diminuzione della massima corrente che il dispositivo è in grado di erogare, inoltre si vede che all'aumentare del tempo di attesa c'è una diminuzione della pendenza delle curve nella zona dell'origine, questo implica che la resistenza del dispositivo aumenta. Questa variazione è probabilmente dovuta al raffreddamento del campione dopo la fine dello step di stress. Andando a confrontare le curve ottenute nella caratterizzazione post stress

eseguite dopo dieci minuti dalla fine dello tress, considerando solamente la curva con $V_g = -4V$ si ottiene il grafico mostrato in figura 4.48.

Nel grafico riportato nella figura 4.48 è riportato un confronto tra le caratteristiche di uscita ottenute nella caratterizzazione DC post stress eseguita a dieci minuti dalla fine dello stress, cioè quando il transitorio termico si è esaurito. Nel grafico si vede il degrado del dispositivo in esame in quanto all'aumentare del tempo di stress si ha una diminuzione della corrente che il


Figura 4.48: confronto 10 minuti dopo la fine dello stress su E2 con $W = 25 \mu m$

dispositivo è in grado di erogare. Negli ultimi step dello stress, il dispositivo è molto degradato anche se non è rotto, come sembra dai grafici, infatti la curva che sembra costante a zero, in realtà ha una forma simile alle altre, con la differenza che il valore di corrente è molto più basso rispetto al valore delle prime curve. Oltre alla diminuzione della massima corrente, il degrado si vede anche dalla variazione della resistenza del dispositivo, infatti in tutti i grafici all'aumentare del tempo di stress, si ha una diminuzione della pendenza, il che implica un aumento della resistenza.



Figura 4.49: confronto ultimo valore di corrente su E2 con $W = 25 \mu m$ Come si può vedere dal grafico riportato in figura 4.49 l'ultimo valore delle

 $I_d - V_d$ diminuisce. And ando a normalizzare le varie curve rispetto al valore ottenuto nella caratterizza zione effettuata subito dopo la fine dello stress, si ottiene il secondo grafico riportato in figura 4.49. Da que sto grafico si vede che and ando ad aumentare il tempo dello stress si vede che la differenza tra la corrente ottenuta dalle $I_d - V_d$ aumenta in quanto l'ampiezza della variazione che viene visualizzata dal grafico è maggiore. Que sto aumento dell'ampiezza della variazione di corrente nelle $I_d - V_d$ è causato probabilmente dal degrado del dispositivo e non dall'autoris caldamento, che dovrebbe calare durante lo stress a causa del calo della corrente di drain.



Figura 4.50: $I_d - V_g$ dopo lo step di stress di 10 minuti su E2 con $W = 25 \mu m$

Dal grafico riportato in figura 4.50 si vede l'andamento delle $I_d - V_g$ eseguite nei cinque diversi istanti temporali. Da tale grafico si vede che andando ad aumentare il tempo di attesa tra la fine dello step di stress e la caratterizzazione DC c'è una diminuzione della massima corrente che il dispositivo è in grado di erogare, inoltre si vede che all'aumentare del tempo di attesa c'è uno shift delle curve verso destra il che implica che c'è uno spostamento della tensione di soglia verso valori più negativi rispetto al valore della V_{th} ottenuto nella caratterizzazione DC eseguita subito dopo la fine dello stress.

Andando a confrontare le curve ottenute nella caratterizzazione post stress eseguita dopo dieci minuti dalla fine dello stress, considerando solamente la curva con $V_d = -24V$ si ottiene il grafico riportato in figura 4.51.



Figura 4.51: confronto $I_d - V_g$ 10 minuti dopo la fine dello stress su E2 con $W = 25 \mu m$

Nel grafico riportato nella figura 4.51 è riportato un contronto tra le $I_d - V_g$ ottenute nella caratterizzazione DC post stress effettuata dopo dieci minuti dalla fine dello step di stress. Nel grafico si vede il degrado del dispositivo in esame in quanto all'aumentare del tempo di stress si ha una diminuzione della corrente che il dispositivo è in grado di erogare. Negli ultimi step dello stress, il dispositivo è molto degradato anche se non è rotto, come sembra dai grafici, infatti la curva che sembra costantemente nulla, in realtà ha una forma simile alle altre, con la differenza che il valore di corrente è molto più basso rispetto al valore della prima curva. Oltre alla diminuzione della massima corrente, il degrado si vede anche dallo shift delle curve verso destra all'aumentare del tempo dello stress. Questo shift delle curve implica una variazione della tensione di soglia del dispositivo in esame. La variazione della tensione di soglia avviene portando il valore di V_{th} a valori più negativi rispetto al valore assunto dalla tensione di soglia all'inizio dello stress.

Nei grafici riportati in figura 4.52 si vedono le variazioni della tensione di soglia nei vari step dello stress in funzione del tempo passato tra le cinque caratterizzazioni DC, la tensione di soglia è stata ottenuta andando a vedere per quale valore della tensione di gate la corrente di drain raggiunge il valore $I_d = 1\mu A$. Il grafico della tensione di soglia normalizzata è ottenuto sottraendo ai valori ottenuti nelle cinque caratterizzazioni DC, il valore della tensione di soglia ottenuto nella misura subito dopo la fine dello stress. Dal grafico con i valori reali, si nota che all'aumentare del tempo di stress la tensione di soglia aumenta, mentre all'aumentare del tempo di attesa si vede anche in questo caso un aumento della tensione di soglia, il che implica uno shift verso destra della curva della caratterizzazione DC prese dopo un passo dello



Figura 4.52: V_{th} con $I_d = 1\mu A$ realizzati dalle DC su E2 con $W = 25\mu m$



Figura 4.53: V_{th} con $I_d = 50 \mu A$ realizzati dalle DC su E2 con $W = 25 \mu m$

stress. Per quanto riguarda l'ampiezza di tale variazione, dal grafico normalizzato si vede che andando ad aumentare il tempo dello stress l'ampiezza di tale variazione aumenta a causa dell'aumentare del degrado del dispositivo, come accadeva nella figura 4.49.

Nei grafici riportati in figura 4.53 si vedono le variazioni della tensione di soglia nei vari step dello stress in funzione del tempo passato tra le cinque caratterizzazioni DC, la tensione di soglia è stata ottenuta andando a vedere per quale valore della tensione di gate la corrente di drain raggiunge il valore $I_d = 50\mu A$. Il grafico della tensione di soglia normalizzata è ottenuto

sottraendo ai valori ottenuti nelle cinque caratterizzazioni DC, il valore della tensione di soglia ottenuto nella misura subito dopo la fine dello stress. Dal grafico con i valori reali, si nota che all'aumentare del tempo di stress la tensione di soglia aumenta, mentre all'aumentare del tempo di attesa si vede anche in questo caso un aumento della tensione di soglia, il che implica uno shift verso destra della curva della caratterizzazione DC prese dopo un passo dello stress. Per quanto riguarda l'ampiezza di tale variazione, dal grafico normalizzato si vede che andando ad aumentare il tempo dello stress, l'ampiezza di tale variazione aumenta a causa dell'aumentare del degrado del dispositivo. Andando a confrontare i grafici normalizzati riportati in figura 4.52 e in figura 4.53, si vede che andando a considerare un valore di corrente di drain maggiore, come riferimento per il calocolo della tensione di soglia, l'ampiezza di tale variazione è più ampia, infatti, la massima ampiezza raggiunta quando è considerata $I_d = 1\mu A$ è di circa il 37%, mentre per quanto riguarda la variazione quando si considera $I_d = 50 \mu A$, la massima ampiezza raggiunge valori superiori al 45%.

Dalla misura delle $I_d - V_g$ si ottiene anche l'andamento della transconduttanza, tale andamento è riportato nel seguente grafico.



Figura 4.54: Transconduttanza dopo lo step di stress di 10 minuti su E2 con $W = 25 \mu m$

Nel grafico riportato in figura 4.54 si vede l'andamento della transconduttanza ottenuta nella caratterizzazione dopo lo stress a dieci minuti. Da questo grafico si vede che le curve ottenute imponendo una bassa tensione al drain hanno un cambiamento minimo, mentre andando ad aumentare il valore della tensione di drain si vede che la differenza tra le curve è maggiore. Un'altra cosa che si può vedere è la diminuzione del valore di picco della transconduttanza all'aumentare del tempo di attesa.



Figura 4.55: Confronto Transconduttanza dopo 10 minuti su E2 con $W=25 \mu m$

Nella figura 4.55 è riportato l'andamento della transconduttanza all'aumentare del tempo di stress. Da tale grafico si vede che all'aumentare del tempo di stress il valore di picco si riduce, inoltre si può notare anche che le curve mostrano uno spostamento verso destra, esattamente come accade per le $I_d - V_g$. Tale spostamento è dovuto alla variazione della tensione di soglia, che all'aumentare del tempo di stress si sposta verso valori in modulo più elevati, rendendo più difficile l'accensione del dispositivo. Come descritto in precedenza lo shift della tensione di soglia è dovuto all'aumentare della concentrazione di difetti e di stati trappola all'interno del materiale a causa dell'elevato tempo nel quale il dispositivo viene tenuto acceso.

Partendo dalle curve ottenute nella caratterizzazione DC, dalla curva delle $I_d - V_d$ ottenuta a $V_g = -4V$ si calcola la resistenza come l'inverso della pendenza della curva nella zona dell'origine. Dalla curva delle $I_d - V_g$ ottenuta a $V_d = -24V$, si calcola la tensione di soglia imponendo come valore della corrente di drain di riferimento il valore $I_d = -50\mu A$. Andando poi a normalizzare i valori ottenuti al valore ottenuto dopo il primo step di stress, si ottiene il grafico riportato in figura 4.56.



Figura 4.56: Correlazione tra $R_{on} \in V_{th}$ su E2 con $W = 25 \mu m$

Andando ad osservare il grafico in figura 4.56, si vede che all'aumentare del tempo di stress imposta al drain la tensione di soglia si sposta verso valori più negativi rispetto al valore iniziale con un andamento monotono crescente. Per quanto riguarda l'andamento della R_{on} si vede che inizialmente la variazione è ridotta, per poi aumentando il tempo di stress aumentare con decisione. Da questo grafico si vede che le due curve non hanno lo stesso andamento, questo suggerisce che i meccanismi di degrado del dispositivo non sia lo stesso. In particolare si può dire che il meccanismo di degrado sia la generazione di difetti e di stati trappola all'interno del materiale in zone diverse di quest'ultimo oppure la generazione avviene con un andamento temporale diverso.

La fase successiva della caratterizzazione post stress consitennell'andare ad eseguire le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide. Nei seguenti grafici è riportato l'andamento della resistenza e della tensione di soglia ricavate da tali misure.

Nei grafici di figura 4.57 è riportato l'andamento della R_{on} nella fase di recovery per la tensione di filling $(V_g = -4; V_d = -15)V$. Nel grafico di sinistra si vede che durante il tempo di recovery il valore della resistenza ha un andamento monotono decrescente tranne nell'ultima curva, la quale mostra un andamento crescente. All'aumentare del tempo di stress, si vede che il valore iniziale di resistenza aumenta a causa del degrado del dispositivo prodotto dallo stress. andando ad osservare il grafico di destra si vede che



Figura 4.57: (a): R_{on} durante il recovery; (b): R_{on} normalizzata durante il recovery su E2 con $W = 25 \mu m$



Figura 4.58: (a): R_{on} durante il recovery; (b): R_{on} normalizzata durante il recovery su E2 con $W = 25 \mu m$

all'aumentare del tempo di stress l'ampiezza del transiente delle R_{on} aumenta confermando l'ipotesi di un aumento della concentrazione di difetti e di stati trappola generati dall'elevato tempo di stress a cui il campione viene sottoposto. Nei gafici di figura 4.58 è riportato l'andamento della R_{on} nella fase di recovery per la tensione di filling $(V_g = 1; V_d = -30)V$. Nel grafico di sinistra si vede che l'andamento della R_{on} presenta un andamento monotono decrescente. All'aumentare del tempo di stress, si vede che il valore iniziale di resistenza aumenta a causa del degrado del dispositivo generato dallo stress. Nel grafico di destra si vede l'andamento dell'ampiezza del transitorio, da tale grafico si vede che all'aumentare del tempo di stress aumenta tale ampiezza, questo va a confermare l'ipotesi dell'aumento della concentrazione di difetti e stati trappola all'interno del materiale generati dall'elevato tempo di stress a cui il campione è stato sottoposto.



Figura 4.59: (a): R_{on} durante il recovery; (b): R_{on} normalizzata durante il recovery con $I_d = 100 \mu A$ su E2 con $W = 25 \mu m$



Figura 4.60: (a): R_{on} durante il recovery; (b): R_{on} normalizzata durante il recovery con $I_d = 100 \mu A \text{su E2 con } W = 25 \mu m$

Nella figura 4.59 è riportato l'andamento della tensione di soglia nella fase di recovery per la tensione di filling $(V_g = -4; V_d = -15)V$. Nel grafico di sinistra si vede che le curve hanno un andamento esponenziale, per le misure effettuate con tempi di stress brevi, le curve mostrano un andamento esponenziale decrescente, mentre per elevati valori del tempo di stress, le curve mostrano un andamento esponenziale crescente. Un altro fatto che si può notare da tale grafico è che il valore iniziale della V_{th} si sposta verso valori più negativi rispetto al valore della prima misura. Dal grafico di destra si vede l'andamento dell'ampiezza del transitorio, come detto prima si vede che per le prime misure le curve si muovono verso valori positivi il che implica un andamento decrescente dell'esponenziale, per tempi lunghi di stress le curve si muovono verso valori negativi il che implica un andamento crescente dell'esponenziale. Il meccanismo che sta dietro a questa variazione nel comportamento delle curve è ancora in fase di analisi.

Nella figura 4.60 è riportato l'andamento della tensione di soglia nella fase di recovery per la tensione di filling $(V_g = 1; V_d = -30)V$. Nel grafico di sinistra si vede che le curve hanno un andamento esponenziale decrescente a causa del recupero dopo la fase di filling in OFF-State. Un altro fatto da notare è che il valore iniziale della tensione di soglia si sposta verso valori più negativi rispetto al valore di V_{th} ottenuto nella caratterizzazione iniziale. Dal grafico di destra si vede la versione normalizzata, da tale grafico si vede che andando ad aumentare il tempo di stress l'ampiezza del transiente descritto dalla tensione di soglia inizialmente aumenta, per poi avere una diminuzione, infine aumentando ancora il tempo di stress si vede che l'ampiezza del transitorio torna ad aumentare. L'aumento in modulo del valore della tensione di soglia e l'aumento dell'ampiezza del transiente sono fenomeni dovuti all'aumentare della concentrazione di difetti e di stati trappola all'interno del materiale, tale aumento è dovuto all'elevato tempo nel quale il campione viene mantenuto sotto stress. Il fenomeno che porta allo strano comportamento del'ampiezza del transiente è ancora in fase di studio.

L'ultima misura effettuata nella caratterizzazione DC è la campana di elettroluminescenza, i risultati ottenuti da questa misura sono riportati in seguito.

Nella figura 4.61 sono riportate le campane di elettroluminescenza. Da questi due grafici si vede che il dispositivo inizia ad emettere fotoni una volta che la tensione di gate supera il valore della tensione di soglia. Dai due grafici si può inoltre vedere che il numero di fotoni emessi quando la tensione al drain è $V_d = -25V$ è maggiore rispeto al numero di fotoni emessi quando la tensione di drain è $V_d = -15V$. Per quanto riguarda il primo grafico si vede che per i primi step dello stress le curve subiscono una diminuzione nel numero di fotoni emessi, andando a spostare il picco di emissione verso valori più positivi, per gli ultimi step dello stress il numero di fotoni emessi è relativamente basso e quindi nel grafico sembra rumore. Per quanto riguarda



Figura 4.61: Campane di elettroluminescenza su E2 con $W = 25 \mu m$

il secondo grafico si vede che anche in questo caso il numero di fotoni emessi andando ad aumentare il tempo di stress diminuisce a causa del degrado del dispositivo, in questo caso, diversamente dal precedente, il picco di emissione si sposta verso tensioni di gate più negative. Anche in questo caso, come nel precedente, per gli ultimi step dello stress il numero di fotoni emessi è molto basso e quindi nel grafico la curva relativa a tali step sembra una costante a zero. Il differente comportamento mostrato dai due grafici, cioè lo spostamento verso valori più positivi per il grafico a $V_d = -15V$ e verso valori più negativi per il grafico a $V_d = -24V$ è attualmente in fase di analisi.



Figura 4.62: (a): Correlazione Id-EL (b): Correlazione Id-EL normalizzata su E2 con $W=25\mu m$ calcolata a $V_g=-4V$ e $V_d=-24V$

Nei grafici riportati in figura 4.62 è riportata la correlazione tra la corrente di drain misurata durante la caratterizzazione DC e l'elettroluminescenza misurata durante le campane di elettroluminescenza, figura (a), mentre nella figura (b) è riportata la versione normalizzata al valore ottenuto nella prima misura. L'andamento della curva nella figura (a) suggerisce che ci possa essere una correlazione tra la diminuzione della corrente e la diminuzione dell'emissione di fotoni, ma andando a vedere il grafico della figura (b) si vede che le variazioni percentuali tra le due quantità sono correlate relativamente bene quindi probabilmente la riduzione dell'elettroluminescenza è dovuta all'effetto combinato della diminuzione della corrente di drain e l'aumento dello scattering elettrone-difetto.

Il calo della curva di elettroluminescenza all'aumentare del tempo di stress può essere causato principalmente da tre fattori: il calo della corrente di drain, la diminuzione del campo elettrico oppure l'incremento dello scattering elettrone-difetto o elettrone-elettrone. Dai grafici riportati in figura 4.62 la diminuzione dell'elettroluminescenza può essere dovuta alla diminuizone della corrente di drain. Mantenendo la tensione ai tre terminali costante è improbabile che la causa della diminuzione dell'emissione di fotoni sia dovuta ad una diminuzione del campo elettrico in quanto ci si aspetta una variazione contenuta. Per quanto riguarda l'aumento dello scattering elettroneelettrone, anche questa ipotesi è poco probabile in quanto all'aumentare del tempo di stress la corrente diminuisce e quindi la probabilità dello scattering tra due elettroni diminuisce. L'ipotesi più probabile per la diminuzione dell'elettroluminescenza è l'aumento dello scattering elettrone-difetto, in quanto aumentando il tempo di stress si vanno a creare nuovi difetti nel materiale e quaindi si ha un aumento della probabilità di scattering tra un elettrone e un difetto con la conseguente diminuzione dell'emissione di fotoni. In conclusione la diminuzione dell'emissione di fotoni può essere dovuta alla combinazione della riduzione della corrente di drain e dall'aumento dello scattering elettrone-difetto.

Conclusioni

Durante l'analisi sono state effettuate misure di caratterizzazione DC preliminare per valutare quali dispositivi all'interno del wafer erano funzionanti e quali no, misure di step-stress per analizzare la robustezza dei transistor, e misure dinamiche quali $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide in diverse condizioni di polarizzazione e di temperatura per investigare i fenomeni di intrappolamento di carica nella struttura del dispositivo.

Dalle $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide eseguite in diverse condizioni di funzionamento del dispositivo ed eseguite a cinque diverse temperature si ricava che il materiale in esame presenta degli stati trappola che possono essere riconducibili a difetti estesi nel materiale o a minibande di energia la cui energia di attivazione è stata trovata essere $E_a = 0.3eV$. Questi stati trappola possono essere generati dalla presenza di atomi di boro all'interno del reticolo cristallino del diamante in posizione sostituzionle o in posizione interstiziale [29][1], ma questo fatto è ancora in fase di analisi. La presenza di questi stati trappola è stata riscontrata anche nella caratterizzazione post stress eseguita nei vari stress eseguiti nei due set di campioni quando sono state eseguite le $I_d - V_d$ e $I_d - V_g$ campionate rapide, nelle quali si vedeva che il valore della R_{on} e della tensione di soglia aveva delle variazioni a causa dell'intrappolameto di carica in questi stati trappola.

Andando a considerare gli step-stress partendo dallo stress eseguito in SEMI-ON-State, si vede che il dispositivo analizzato non è rappresentativo del comportamento medio del wafer. Per quanto riguarda gli stress eseguiti nella condizione di OFF-State nei due set di campioni si può vedere che i dispositivi riescono a sostenere una tensione di drain elevata, infatti riescono a sostenere tensioni comprese tra $V_d = -100V$ e $V_d = -130V$ mostrando comunque un degrado significativo, cioè la corrente che circola nel dispositivo in questa condizione è molto bassa, ma all'aumentare della tensione di stress si ha un aumento della corrente di drain. Per quanto riguarda lo stress in ON-State nei due set di campioni si può vedere che i dispositivi riescono a sostenere una tensione elevata mantenendo la tensione di drain costante ed elevata per tutta la durata della misura, quindi avendo una corrente e una tensio-

ne elevata si ha anche una potenza elevata, andando comunque a degradare le caratteristiche del dispositivo, in quanto si può vedere un peggioramento della corrente di saturazione e delle R_{on} . La tensione che porta alla rottura dei dispositivi varia tra $V_d = -85V$
e $V_d = -95V$ con correnti di drain che durante lo stress variano tra $I_d = -15mA$ e $I_d = -28mA$. Da questi risultati si può affermare che i dispositivi sottoposti allo stress in OFF-State si sono rotti a causa dell'elevato campo elettrico che si viene a formare all'interno del dispositivo, campo elettrico che supera il campo elettrico di breakdown del materiale e questo comporta la rottura del dispositivo e anche dal livello di potenza che si raggiunge negli ultimi step dello stress. Per quanto riguarda i dispositivi sottoposti allo stress in ON-State si sono rotti a causa dell'elevato valore del campo elettrico che si viene a formare tra drain e source insieme all'elevata potenza (valori superiori a 2W) che il dispositivo deve sopportare durante la misura. Andando a confrontare la potenza per mm nel momento della rottura dei dispositivi si vede che si raggiungono valori elevati che variano tra 12.5W/mm e 25.7W/mm.

Per quanto riguarda l'ultima misura eseguita, cioè il constant stress, si vede che per i primi step la corrente di drain rimane costante, andando poi ad aumentare il tempo di stress si vede che il dispositivo degrada andando a ridurre la corrente che è in grado di erogare. Negli ultimi step dello stress si vede che anche durante la misura la corrente cala a causa dell'elevato degrado accumulato dal dispositivo durante la misura. In definitva si può dire che il dispositivo degrada già dai primi step dello stress con un degrado graduale come si può vedere dai grafici ottenuti nella caratterizzazione post stress.

Le misure di elettroluminescenza, infine, testimoniano l'emissione di fotoni generati con il meccanismo della radiazione da frenamento. L'intensità dell'emissione è maggiore negli stress in ON-State rispetto a quella in OFF-State in quanto la concentrazione di portatori che si viene a formare sotto al terminale di gate è maggiore quando il dispositivo è in ON, quindi si ha un maggior numero di portatori che possono essere accelerati dal campo elettrico e possono andare ad urtare gli atomi del reticolo cristallino e dare origine ai fotoni.

Dalle campane di elettroluminescenza si vede che l'emissione diminuisce all'aumentare della tensione o il tempo di stress, questo fatto può essere provocato principalmente da tre meccanismi, la diminuzione della corrente di drain, la diminuzione del campo elettrico oppure l'incremento dello scattering elettrone-elettrone o elettrone-difetto. Dalle misure eseguite e dai grafici che riportano la correlazione tra l'elettroluminescenza e la corrente di drain si vede che la diminuzione dell'emissione non è interamente dovuta alla diminuzione della corrente, infatti nel constant stress si vede che la diminuzione dell'elettroluminescenza è correlata alla diminuzione della corrente. Nella misure eseguite si ha che la tensione imposta al drain aumenta, negli stepstress, o rimane costante, nel constant stress, quindi il campo elettrico che si genera nel dispositivo negli step stress tende ad aumentare mentre nel constant stress rimane all'incirca stabile, quindi anche la diminuzione del campo elettrico non può essere la causa della diminuzione dell'emisisone. Andando a vedere tutti i grafici della caratterizzazione DC post stress si vede che la corrente di drain tende a diminuire, questo fatto rende meno probabile lo scattering elettrone-elettrone e quindi anche questo meccanismo non è quello che fa diminuire l'elettroluminescenza. La cosa comune a tutti gli stress eseguiti è l'aumento della concentrazione di difetti nel materiale, questo fa aumentare la probabilità di scattering tra un elettrone e un difetto, questo meccanismo è la principale causa della diminuzione dell'emisisone di fotoni da parte dei dispositivi.

Bibliografia

- S. Wang; P. Sellin e A. Lohstroh. «Temperature dependent hole detrapping for unprimed polycrystalline chemical vapor deposited diamond». 2006.
- [2] S. Rehman; U. F. Ahmed; M. M. Ahmed et al. «Temperature Dependent Analytical DC Model for Wide Bandgap MESFETs». 2019.
- Claudio Verona; Walter Ciccognani; Sergio Colangeli e altri. «Gate-Source Distance Scaling Effects in H-Terminated Diamond MESFETs». 2015.
- [4] Satoshi Tanimoto; Tatsuhiro Suzuki; Sawa Araki et al. «High Temperature Reliability Assessment and Degradation Analysis for Diamond Semiconductor Devices». 2017.
- [5] Hans P. Zappe; Donat J. As. «Mechanisms for the emission of visible light from GaAs field-effect transistors». 1998.
- [6] Pankaj B. Shah; James Weil; A. Glen Birdwell e Tony Ivanov. «Charge Trapping Analysis of High Speed Diamond FETs». 2017.
- [7] Man Hoi Wong; Yi Pei; Rongming Chu e otehrs. «N-Face Metal Insulator Semiconductor High-Electron-Mobility Transistors With AlN Back-Barrier». 2008.
- [8] Pei-Kang Chung; e Shun-Tung Yen. «Efficient far-infrared thermal bremsstrahlung radiation from a heterojunction bipolar transistor». 2015.
- [9] R S Balmer; J R Brandon; S L Clewes et al. «Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications». 2009.
- [10] Claudio Verona; Walter Ciccognani; Sergio Colangeli et al. «V2O5 MISFETs on H-Terminated Diamond». 2016.
- [11] J. P. Colinge; C. A. Colinge. «Physics of Semiconductor Devices». 2006.

- [12] W. R. Curtice. «MESFET Model for Use in the Design of GaAs Integrated Circuits». 1980.
- [13] A. J. McCaman; G.McCormack e D. H. Smith. «An Improved GaAs MESFET Model for SPICE». 1990.
- [14] Kazuyuki Hirama; Hisashi Sato; Yuichi Harada et al. «Thermally Stable Operation of H-Terminated Diamond FETs by NO2 Adsorption and Al2O3 Passivation». 2012.
- [15] J. Y. Tsao; S. Chowdhury; M. A. Hollis et al. «Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges». 2018.
- [16] U. K. Mishra e J. Singh. «Semiconductor Device Physics and Design». 2008.
- [17] Olivier Gaudin; Damianos K. Troupis; Richard B. Jackmanl et al. «Charge-based deep level transient spectroscopy of phosphorousdoped homoepitaxial diamond». 2003.
- [18] Makoto Kasu; Kenji Ueda; Hiroyuki Kageshima; e Yoshitaka Taniyasu. «Diamond RF FETs and other approaches to electronics». 2008.
- [19] Makoto Kasu. «Diamond Field-effect Transistors as Microwave Power Amplifiers». 2010.
- [20] P. L. Ilreike; D. M. Fleetwood; D. B. King et al. «An Overview of High-Temperature Electronic Device Technologies and Potential Applications». 1994.
- [21] Nianjun Yang; Siyu Yu; Julie V. Macpherson et al. «Conductive diamond: synthesis, properties, and electrochemical applications». 2019.
- [22] Gordon Davies; Jan Isberg; Alison Mainwood et al. «CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors». 2009.
- [23] S Salvatori; M Girolami; P Oliva et al. «Diamond device architectures for UV laser monitoring». 2016.
- [24] Yasar Gurbuz a; Onur Esame a; Ibrahim Tekin et al. «Diamond semiconductor technology for RF device applications». 2005.
- [25] Michael Schwander; Knut Partes. «A review of diamond synthesis by CVD processes». 2011.
- [26] Dimitris Pavlidis. «HBT vs. PHEMT vs. MESFET: What's best and why». 1999.
- [27] Fengbin Liu; Yan Cui; Min Qu e Jiejian Di. «Effects of hydrogen atoms on surface conductivity of diamond film». 2015.

- [28] Yuri N. Palyanov; Igor N. Kupriyanov; Alexander F. Khokhryakov; Victor G. Ralchenko. «Crystal Growth of Diamond». 2015.
- [29] M. Bruzzia; D. Menichelli e S. Sciortino. «Deep levels and trapping mechanisms in chemical vapor deposited diamond». 2002.
- [30] Asif Hassan; Abu Shakil Ahmed; Tasnim Sultana. «Determination of Characteristics and Performance Appraisal of GaN MESFET». 2018.
- [31] R. S. Muller e T. I. Kamins. «Device Electronics for Integrated Circuits». 2002.
- [32] M. Benabdesselam; A. Petitfils; F. Wrobel et al. «Thermal quenching investigation in chemical vapor deposited diamond by simultaneous detection of thermally stimulated luminescence and conductivity». 2008.
- [33] Michale W. Geis; Travis C. Wade; Charles H. Wuorio et al. «Progress Toward Diamond Power Field-Effect Transistors». 2018.
- [34] A. Neviani; C. Tedesco; E. Zanoni et al. «Impact ionization and light emission in GaAs metal-semiconductor field effect transistors». 1998.
- [35] Payam Mehr; Soroush Moallemi; Xiong Zhang et al. «CMOS-Compatible MESFETs for High Power RF Integrated Circuits». 2019.
- [36] Yu Fu; R. Xu; J. Zhou et al. «A Large-Signal Model for Two-Dimensional Hole Gas Diamond MOSFET Based on the QPZD». 2019.