

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI
INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA E
MECCATRONICA

CURRICULUM MECCATRONICO

**DISPOSITIVI GAN NELL'ELETTRONICA DI POTENZA:
STATO DELL'ARTE E TECNICHE DI CONDITION
MONITORING**

RELATORE: PROF. ING. PAOLO MAGNONE

LAUREANDO: ARRIGO CONFETTI

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

INDICE

SOMMARIO	4
Capitolo I	5
STATO DELL'ARTE DEI DISPOSITIVI AL GAN-HEMT	5
1.1 Analisi di mercato dei dispositivi al GaN nell'elettronica di potenza ...	5
1.2 Proprietà del nitruro di gallio e confronto con le proprietà del Silicio	7
1.3 Dispositivi GaN HEMT	13
1.4 Dispositivi GaN normalmente on	16
1.5 Dispositivi GaN normalmente off	18
1.5.1 Configurazione Cascode	19
1.5.2 Gate p-GaN	21
1.5.3 Recessed gate hybrid MISHEMT	24
1.5.4 Conclusioni sulle configurazioni normalmente off elencate	27
1.6 Metodiche di fabbricazione dei dispositivi GaN a basso danneggiamento	29
1.6.1 Incisione digitale	29
1.6.2 Strained engineering	31
1.6.3 Crescita selettiva del gate p-GaN	32
Capitolo II	34
TECNICHE PROGNOSTICHE E DIAGNOSTICHE DEI DISPOSITIVI GAN E CONDITION MONITORING	34
2.1 Introduzione al condition monitoring	34
2.2 Valutazione del grado di affidabilità dei dispositivi elettronici	35
2.3 Meccanismi di guasto nei dispositivi GaN	39
2.3.1 La degradazione del contatto	39
2.3.2 Portatori caldi e generazione di trappole	39
2.3.3 Effetto piezoelettrico inverso	40
2.2.4 Riassunto in tabella e rappresentazione grafica della degradazione di contatto, dei portatori caldi e della generazione di trappole e dell'effetto piezoelettrico nei dispositivi	41
2.3.5 Sollecitazioni termomeccaniche	42
2.4 Analisi Alt e precursori di guasto nei HEMT in GaN	43

2.4.1 Effetto dell'invecchiamento sulla IGsS	45
2.4.2 Effetto dell'invecchiamento sulla corrente di dispersione tra drain e source IDSs.....	46
2.4.3 Effetto dell'invecchiamento sulla tensione di soglia VTH	46
2.4.4 Effetto dell'invecchiamento sulla resistenza di on RDson.....	47
2.4.5 Effetto dell'invecchiamento sul tempo di accensione Ton.....	48
2.5 Alcune tecniche innovative di condition monitoring adattivo.....	49
2.5.1 Condition monitoring basato su RDson	50
2.5.2 Monitoraggio delle condizioni basato su Ton	52
2.5.3 Rilevamento del guasto dielettrico basato su IGsS	54
2.5.4 Monitoraggio simultaneo di RDson e VTH durante la fase di commutazione	55
CONCLUSIONI.....	58
BIBLIOGRAFIA.....	60

SOMMARIO

L'incessante richiesta di migliori prestazioni energetiche e minori consumi ha evidenziato la necessità di sviluppare dispositivi elettronici basati su semiconduttori alternativi che permettano di superare i limiti della tecnologia in Silicio. Uno dei semiconduttori maggiormente candidati a rivoluzionare la componentistica elettronica è il nitruro di gallio (GaN). Il GaN, infatti, ha ottime proprietà elettroniche intrinseche come un: ampio energy gap, un elevato campo elettrico critico e un'alta velocità di saturazione degli elettroni, che permettono la costruzione di transistor ad alta mobilità elettronica HEMT con caratteristiche come una frequenza di commutazione, una potenza di esercizio e un'efficienza, nettamente superiori rispetto a quelle fornite dai classici transistor in silicio. Ai fini di una migliore comprensione della tecnologia GaN adottata nell'elettronica di potenza, il suddetto documento di ricerca bibliografica si pone come obiettivo quello di: descrivere nel primo capitolo lo state dell'arte dei transistor ad alta mobilità elettronica in GaN e di descrivere nel secondo capitolo le tecniche di condition monitoring che sono state sviluppate dalla comunità scientifica, al fine di consentire un utilizzo sicuro e ottimale degli innovativi dispositivi elettronici basati sulla tecnologia GaN.

Capitolo I

STATO DELL'ARTE DEI DISPOSITIVI AL GAN-HEMT

1.1 Analisi di mercato dei dispositivi al GaN nell'elettronica di potenza

L'elettronica di potenza è quel ramo dell'elettronica che si occupa di sviluppare sistemi tecnologici in grado di gestire l'energia elettrica tramite il controllo o la modifica di grandezze di interesse come: corrente, tensione, potenza, frequenza, ampiezza e forma d'onda, a seconda dell'applicazione desiderata.

Il funzionamento peculiare ed estremamente vantaggioso dei dispositivi di potenza è possibile grazie ai semiconduttori presenti all'interno della loro struttura. In particolare, i semiconduttori sono materiali contraddistinti da parziale conducibilità in grado di movimentare elettroni (n) in banda di conduzione, o lacune (p) in banda di valenza fornendo una quantità di energia che sia superiore al BandGap del materiale. Da oltre cinquant'anni il semiconduttore più utilizzato dall'industria dell'elettronica è il Silicio, tuttavia, la sempre crescente domanda di energia globale destinata ad aumentare fino al 40%, nei prossimi vent'anni [1] e l'incessante bisogno di sistemi elettronici sempre più performanti ma capaci di occupare spazi sempre più contenuti, ha spinto la ricerca verso lo studio e lo sviluppo di semiconduttori alternativi, detti ad alto band gap (WBG), che fossero in grado di aumentare l'efficienza energetica intrinseca dei dispositivi elettronici rispetto ai dispositivi al Silicio. Uno dei semiconduttori ad alto band gap maggiormente candidato a sostituire il Silicio nelle applicazioni della futura elettronica di potenza ad alta efficienza energetica è il Nitruro di Gallio (GaN) in quanto questo presenta ottime proprietà elettroniche intrinseche come un: ampio energy gap, un elevato campo elettrico critico e un'alta velocità di saturazione degli elettroni.

Il nitruro di Gallio è un composto costituito da Azoto (N) e Gallio (Ga) che presenta come struttura cristallina stabile la wurtzite esagonale. Il GaN si può considerare un materiale raro per due ragioni fondamentali. Innanzitutto, la crosta terrestre continentale ha una disponibilità di Gallio pari a 19 PPM (parti per milione) di massa. In secondo luogo, in natura, il gallio non è presente in forma elementare ma come composto minerario legato ad altri elementi come alluminio, zinco e germanio. Di conseguenza, molto spesso esso è ottenuto come sottoprodotto di Alluminio, tuttavia il processo di separazione del Gallio dalla Bauxite, il principale

minerale grezzo dell'alluminio [2], è molto oneroso e viene quindi effettuato in aree geografiche dove la manodopera e l'energia siano più economiche, come in Cina. Oltre a questo aspetto, condizione necessaria per la produzione di semiconduttori al GaN è che il Gallio abbia una purezza estrema, manifestando una quantità di sostanze estranee pari al più ad un centomillesimo fig. 1.1. La purificazione può avvenire attraverso molteplici tecniche, la più utilizzata è la distillazione a vuoto.

Un altro aspetto molto rilevante legato al Gallio e, quindi, indirettamente, anche al nitruro di Gallio, è il fatto che i suoi principali produttori sono Cina, Germania, Ucraina e Kazakistan. Altri stati come Stati Uniti, Giappone e Regno Unito non sono produttori diretti di questo materiale, ma riescono tuttavia a commercializzarne una buona quantità grazie al riciclo di rottami. Fra i paesi produttori, si può dire che la Cina detenga quasi un monopolio, soddisfacendo il 95% della domanda a livello globale [3].



Figura 1.1: sx) lingotto di gallio purissimo; dx) solido di nitruro di gallio

Problematiche legate al costo di produzione e alla fabbricazione del cristallo di nitruro di gallio puro ne hanno rallentato la diffusione nel mercato dell'elettronica, settore che, però, risulta essere in rapida espansione in quanto vari studi prevedono che il valore di mercato del GaN globale possa raggiungere 2 miliardi di dollari entro il 2027 e mostrare un tasso annuo di crescita composto (CAGR), in un arco temporale che va dal 2020 al 2027, superiore del 70% [4]. Infatti, grazie alle sue ampie potenzialità in molte applicazioni tecnologiche, il GaN si è rivelato essere un ottimo sostituto per il Silicio in tutte quelle applicazioni che prevedono alta frequenza di commutazione e livelli di tensione medio bassi (200-600 V). Per livelli di tensioni che vanno dai 600 ai 900 Volt ci si aspetta una sorta di ripartizione del mercato tra il nitruro di Gallio e un altro importantissimo semiconduttore WBG che è il Carburo di Silicio, mentre per utilizzi che richiedono tensioni superiori a 1200

V, come reti di distribuzione dell'energia elettrica o l'alimentazione di treni e navi, si ritiene che sarà il SiC a vincere sul GaN qual'ora non si riuscisse a migliorare significativamente la qualità dei cristalli e le caratteristiche dei dispositivi GaN [5]. Da queste premesse, si può facilmente dedurre che le potenzialità di diffusione industriale nel campo dell'elettronica di potenza del nitruro di gallio siano enormi. Alcune applicazioni appartenenti all'intervallo di tensione competente ai dispositivi GaN possono essere ad esempio:

- L'elettronica di consumo: alimentatori, carica batterie, amplificatori audio;
- I dispositivi per radiofrequenze come moduli multi-chip 5g;
- I convertitori DC-DC;
- Gli inverter;
- I veicoli elettrici o ibridi;
- L'optoelettronica (LED e laser).

È doveroso riconoscere una certa importanza all'ultimo punto dell'elenco precedente, in quanto è stato il settore dell'illuminazione e dei dispositivi led che ha permesso di accelerare il processo di ricerca e sviluppo del nitruro di gallio. Considerando poi le varie aziende che popolano il mercato in esame, commerciando dispositivi GaN, si possono citare GaN Systems, Wolfspeed, Infineon Technologies e STMicroelectronics, proprietaria anche di Exagan.

1.2 Proprietà del nitruro di gallio e confronto con le proprietà del Silicio

Le proprietà del nitruro di gallio (GaN), di cui si è già accennato nel paragrafo precedente, rappresentano i motivi per cui il GaN negli ultimi anni è stato tenuto molto in considerazione dalla comunità scientifica e perché lo si ritiene uno dei semiconduttori che sarà in grado di dar vita ad una nuova generazione di dispositivi microelettronici grazie al: suo ampio energy gap, al basso consumo energetico e alla sua ottima tolleranza a elevate temperature di esercizio. Inoltre, il GaN è un composto molto stabile termicamente e chimicamente e potrebbe essere utilizzato anche per applicazioni in ambienti estremi con alta pressione e alta temperatura. L'unione di queste caratteristiche con una grande costante piezoelettrica intrinseca del GaN, rendono il nitruro di gallio un ottimo materiale anche per la costruzione di sensori piezoelettrici in grado di operare in condizioni ostili [6].

Nella tabella 1.1 si elencano alcune proprietà del nitruro di gallio.

Densità	6,1 g/cm ³
Densità atomica	4.37*10 ²² atomi/cm ³
Punto di fusione	2573 °C a 60 kbar
Coefficiente di espansione lineare	5.6* $\frac{10^{-6}}{a_0}$, 3.2* $\frac{10^{-6}}{c_0}$ con a_0 e c_0 parametri reticolari
Conducibilità termica	1,3-2,1 W/(cm*K)
Bandgap energetico	3.4 eV
Campo elettrico critico	3-3.75 MV/cm
Mobilità degli elettroni	1100-1300 $\frac{cm^2}{(V*s)}$
Velocità di saturazione degli elettroni	3 × 10 ⁷ cm/s
Concentrazione di portatori intrinseci	~ 10 ¹⁰ elettroni/cm ³ @ 300 K
Affinità degli elettroni	3.1-4.1 eV
Costante dielettrica relativa	9.5

Tabella 1.1: Proprietà del nitruro di gallio

Come già citato nel paragrafo precedente, il nitruro di gallio si manifesta come forma cristallina termodinamicamente stabile a temperatura ambiente e a pressione atmosferica la wurtzite esagonale, tuttavia, essendo un composto appartenente al III-Nitruro può assumere altre strutture reticolari come la miscela di zinco (zinco-blenda reticolo cubico) e il pnma-GaN (ortorombico) [7].

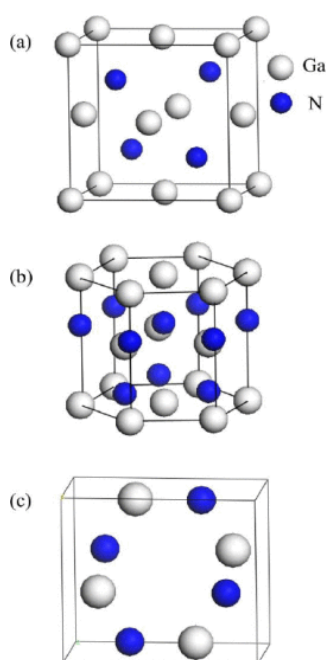


Figura 1.2: a) Zinco-blenda; b) wurtzite esagonale; c) pnma-GaN [8]

Poiché il gallio è meno elettronegativo dell'azoto nelle molecole di GaN si manifesta un campo di polarizzazione spontaneo P_{sp} lungo l'asse longitudinale del cristallo di wurtzite, tale caratteristica è definita come polarizzazione spontanea ed è presente nel semiconduttore indipendentemente dalla presenza di sollecitazioni o tensioni esterne, tuttavia la presenza di fattori esogeni può introdurre un contributo che va a sommarsi alla polarizzazione spontanea che prende il nome di polarizzazione piezoelettrica P_{PE} , dove la causa è una deformazione o una sollecitazione e l'effetto è un campo elettrico.

Una delle difficoltà che hanno caratterizzato e ostacolato da subito lo sviluppo dei dispositivi al GaN è stata la possibilità di sviluppare un substrato adeguato al nitruro di gallio in quanto per la produzione di componenti elettronici di potenza è fondamentale ottenere strutture epitassiali con determinate caratteristiche.

Per innescare la nucleazione ed ottenere un cristallo di nitruro di gallio è necessaria la presenza di un substrato su cui possano adagiarsi gli atomi di gallio e azoto. Nel caso del GaN, come di altri semiconduttori, non si manifesta la formazione di un substrato omogeneo e quindi dello stesso nitruro di gallio (omoepitassia), ciò ha rappresentato una problematica per la produzione di cristalli di GaN che è stata risolta grazie all'eteroepitassia, in cui si utilizzano dei substrati di materiale diverso da quello base su cui innescare la nucleazione e l'accrescimento dei cristalli di GaN. Si sono testati negli ultimi anni diversi substrati eterogenei, i più famosi sono: lo zaffiro (Al_2O_3), il silicio (Si) e il carburo di silicio (SiC). Lo zaffiro è stato il primo materiale che ha permesso lo sviluppo dei primi transistor al GaN, tuttavia, a causa di un elevato mismatch reticolare, cioè asimmetria e scarsa compatibilità tra i reticoli delle due strutture, si otteneva un cristallo con un'alta densità di dislocazioni e quindi un'elevata difettosità del componente, comunque ancora oggi lo zaffiro è molto usato come substrato eterogeneo per applicazioni inerenti alla costruzione di led o laser. Per ridurre il disallineamento reticolare, è stato introdotto un substrato di SiC, ma l'elevato costo necessario per ottenere un substrato in carburo di silicio di dimensioni adatte e la comunque significativa densità di difetti nel cristallo, ha spinto la ricerca a cercare di far nucleare il nitruro di gallio su un materiale più economico, il Silicio, il quale presenta meno difetti intrinseci e la possibilità di ottenere substrati di grandi dimensioni più agevolmente rispetto al suo carburo, fermo restando che avendo un reticolo diverso da quello del GaN si introducono comunque nel cristallo un alto numero di difetti lineari e planari. Grazie all'utilizzo

di substrati di Silicio Panasonic è riuscita a ottenere delle eterostrutture Si/GaN con dimensioni fino a 200 millimetri con una densità di difetti tollerabile.

Un altro aspetto dell'eteroepitassia che complica la cristallizzazione del nitruro di gallio è che il substrato, essendo di materiale diverso dal GaN, mostra un coefficiente di espansione termica differente rispetto a quello del semiconduttore, ciò può portare facilmente all'introduzione di tensioni residue di compressione nelle fasi di esercizio del dispositivo e quindi all'insorgere di cricche a causa della diversa dilatazione termica dei due materiali. Per risolvere tale problematica si sono inseriti tra il substrato e il semiconduttore degli strati di materiale intermedio come AlN o AlGaN.

Si evince quindi che l'ideale sarebbe riuscire ad ottenere una omoepitassia, quindi, produrre un substrato di GaN su cui cristallizzare il nitruro di gallio con un processo che sia economicamente sostenibile e permetta di ottenere un materiale affidabile, di qualità e di dimensioni adeguate evitando così tutte quelle problematiche, precedentemente citate, tipiche dell'eteroepitassia. Va evidenziata però un'importante caratteristica intrinseca di alcune eterostrutture ossia la loro capacità di permettere un'ingegnerizzazione dell'energy gap. Una struttura molto importante proprio per questo aspetto nell'elettronica di potenza è l'AlGaN/GaN, ed è ottenuta drogando leggermente il substrato di Gallio con atomi di Alluminio per sostituzione. L'ausilio della lega AlGaN come substrato su cui cristallizzare il GaN causa la manifestazione di una nube elettronica bidimensionale (2DEG) all'interfaccia, che permette il moto di elettroni solo lungo gli assi x e y e non lungo tutte e tre le dimensioni come i classici transistor a effetto di campo (FET). Il confinamento del moto delle cariche lungo solo due dimensioni riduce drasticamente lo scattering coulombiano e permette come conseguenza di ottenere dispositivi con una maggior mobilità elettronica. Il 2DEG è un processo importantissimo su cui è basato il principio di funzionamento dei transistor ad alta mobilità elettronica (HEMT) costituiti da strutture AlGaN/GaN, in quanto consente una mobilità elettronica molto elevata e rende i HEMT capaci di raggiungere alte frequenze di commutazione. Si comprende quindi che le proprietà intrinseche del nitruro di gallio unite al gas di elettroni bidimensionale caratteristico delle eterostrutture AlGaN consente di ottenere una mobilità elettronica nei dispositivi dell'elettronica di potenza molto più elevata rispetto ai diffusi componenti in Silicio [7].

Al fine di visualizzare meglio i motivi per cui il nitruro di gallio abbia le potenzialità di rivoluzionare l'elettronica di potenza globale nei prossimi anni, è utile mettere a confronto alcune delle sue proprietà fisiche con quelle del Silicio sfruttando quindi la tabella 1.2:

Proprietà	Unità di misura	Si	GaN
Bandgap	eV	1.12	3.4
Campo critico E_{cr}	MV/cm	0.25	4
Costante dielettrica ϵ	$\frac{C^2}{Nm^2}$	11.8	9.5
Velocità di saturazione v_s	cm/s	1	3
Mobilità elettroni μ	$\frac{cm^2}{Vs}$	1350	1300 (2DEG)
Concentrazione intrinseca di portatori n_i a 300 K	cm^{-3}	1010	10^{-10}
Conducibilità termica k	W/cmK	1.5	1.3

Tabella 1.2: Confronto di alcune proprietà fisiche del GaN con quelle del Si

La tabella 1.2 mette evidenza che il GaN rispetto al Silicio mostra:

- un energy gap circa tre volte più grande dell'energy gap del Silicio, il che si traduce in una densità di portatori minoritari n_{iGaN} nettamente inferiore rispetto a quella del Si e per questo motivo ci si aspetta nei dispositivi GaN minor corrente di dispersione;
- un campo elettrico critico e una tensione di rottura (breakdown) maggiori a parità di R_{on} , quindi si può ritenere il GaN un semiconduttore che permetta la costruzione di dispositivi elettronici con un migliore trade-off tra tensione di breakdown e laR_{on} . Questi vantaggi permettono di ottenere con il nitruro

di gallio dei dispositivi di dimensioni più contenute rispetto ai dispositivi in Silicio, di conseguenza le frequenze di commutazione sono più elevate;

- una velocità di saturazione superiore quindi una predisposizione superiore per applicazioni a elevata frequenza di commutazione;
- una mobilità degli elettroni simile, ma il 2DEG caratteristico dell'eterostruttura AlGa_N/Ga_N rendono la tecnologia Ga_N ancora più superiore nelle applicazioni ad alta frequenza nell'elettronica di potenza rispetto a quella in Si.

Per comprendere le potenzialità tecnologiche di un semiconduttore e stimare la bontà dei dispositivi elettronici, sono molte utili le figure di merito FOM (figure of merit), in quanto esprimono un confronto diretto tra alcune caratteristiche del Ga_N (o all'occorrenza anche di altri semiconduttori). Le FOM maggiormente utilizzate per la valutazione dei HEMT sono:

- la figura di merito di Johnson (JFOM) che indica la capacità massima di eccitare i portatori di carica tramite il campo elettrico nel semiconduttore e vale $JFOM = \frac{E_c * v_s}{2\pi}$, con E_c campo elettrico critico e v_s velocità di saturazione;
- la figura di merito di Baliga che indica le minime perdite di conduzione causate da un funzionamento a bassa frequenza, più è alto il valore minori sono le perdite e vale $BFOM = \epsilon * \mu * E_G^2$, con ϵ costante dielettrica del semiconduttore, μ mobilità degli elettroni e E_G band gap del materiale;
- la figura di merito di Baliga ad alta frequenza BHFFOM che è analoga alla BFOM solo che rappresenta le minime perdite di conduzione per un funzionamento ad alta frequenza e vale $BHFFOM = \frac{1}{R_{ONsp} * C_{INsp}} = f_B$, con R_{ONsp} resistenza di on specifica, C_{INsp} capacità di input specifica e f_B frequenza della figura di merito in quanto la BHFFOM ha le dimensioni della frequenza [9].

In tabella 1.3 sono riportate le FOM del nitruro di gallio normalizzate con le FOM del Silicio [1].

Figura di merito (FOM)	Valore numerico
JFOM $(v_s E_{cr})^2 GaN / (v_s E_{cr})^2 Si$	2304

BFOM ($\mu\epsilon E_g^3$) GaN/ $(\mu\epsilon E_g^3)$ Si	3175
BHFFOM ($\mu\epsilon E_g^2$) GaN/ $(\mu\epsilon E_g^2)$ Si	246

Tabella 1.3: Figure di merito del GaN normalizzate con quelle del Si

Il fatto che le figure di merito del GaN normalizzate con quelle del Si siano tutte ampiamente maggiori di uno, rappresenta un'ottima premessa per il futuro dell'elettronica di potenza e il progresso tecnologico che può portare lo sviluppo di tale semiconduttore, in quanto dai seguenti dati è lecito sostenere che grazie ai dispositivi GaN sarà possibile ridurre drasticamente le perdite di potenza nelle applicazioni sia a bassa che ad alta frequenza di commutazione, ottenere prestazioni migliori e consentire temperature di esercizio superiori [9].

1.3 Dispositivi GaN HEMT

Il transistor rappresenta una delle invenzioni più importanti del secolo scorso ed è ancora oggi uno dei più importanti dispositivi dell'elettronica di potenza, in quanto il suo funzionamento caratteristico basato su delle proprietà tipiche dei semiconduttori e delle giunzioni pn ha permesso di rivoluzionare il mondo dell'elettronica e della tecnologia. La prima famiglia di transistor che è stata sviluppata è stata la famiglia dei transistor a giunzione bipolare BJT (bipolar junction transistor) ottenuti dall'accostamento di due giunzioni pn.

L'altra famiglia di transistor è quella dei transistor a effetto di campo FET (field effect transistor), nella quale rientrano i MOSFET. Il MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor) rispetto al BJT, risulta essere un dispositivo: unipolare, pilotato in tensione, con una potenza di pilotaggio necessaria inferiore a causa della ridotta corrente di gate richiesta per il funzionamento, in grado di raggiungere una frequenza di commutazione molto più elevata, meno sensibile alle alte temperature, più adatto alla condivisione di corrente in parallelo e all'implementazione di porte logiche grazie alla tecnologia c-MOS (complementary metal oxide semiconductor). Al BJT va però riconosciuta una maggior efficienza nella gestione della potenza [12].

In generale i transistor che siano in configurazione di BJT o di MOSFET permettono la costruzione di importanti dispositivi elettronici come: switch, oscillatori o amplificatori, a causa però della costante richiesta globale di prestazioni superiori e consumi/perdite inferiori rispetto a quelle fornite dai classici transistor in

silicio si sono sviluppati, con l'ausilio di semiconduttori alternativi, i transistor ad alta mobilità elettronica HEMT (high electron mobility transistor), detti anche transistor a effetto di campo drogato con modulazione MODFET (modulation doped field effect transistor) o transistor a effetto di campo a eterogiunzione HFET (high field effect transistor). Tali dispositivi sono molto importanti nelle applicazioni ad alta frequenza o a rumore ridotto e hanno le potenzialità di rivoluzionare il mondo dell'elettronica globale grazie alle loro caratteristiche, una fra tutte è la possibilità concessa dagli HEMT di formare un canale di elettroni bidimensionale (2DEG) grazie all'ausilio di eterostrutture AlGa_N. Il 2DEG rende il dispositivo adatto alle applicazioni ad alta frequenza in quanto è un tipo di canale che permette il moto degli elettroni liberi solo in due dimensioni, il che causa una riduzione della probabilità di scontro e deviazione durante il moto di carica degli elettroni contro gli atomi del reticolo, ottenendo così una mobilità delle cariche libere nettamente superiore, e di conseguenza, un semiconduttore con proprietà, descritte nel paragrafo precedente, migliori e importanti vantaggi tecnologici. Un aspetto molto interessante degli HEMT in AlGa_N/Ga_N è la loro peculiarità di riuscire a ottenere il canale di elettroni bidimensionale senza la necessità di drogare la zona dell'interfaccia. Ciò consente di generare il 2DEG, e quindi di implementare dispositivi ad alta mobilità elettronica, evitando di introdurre quei difetti nella struttura cristallina del materiale che sono tipici del drogaggio [13].

La struttura dei transistor ad alta mobilità elettronica somiglia a quella dei FET solo che, a differenza dei MOSFET in cui si fa in modo di ottenere nel dispositivo zone a diversa drogatura specifica, nei HEMT si impiantano giunzioni di semiconduttori diversi ottenendo dell'eterogiunzioni come mostrato in fig. 1.3.

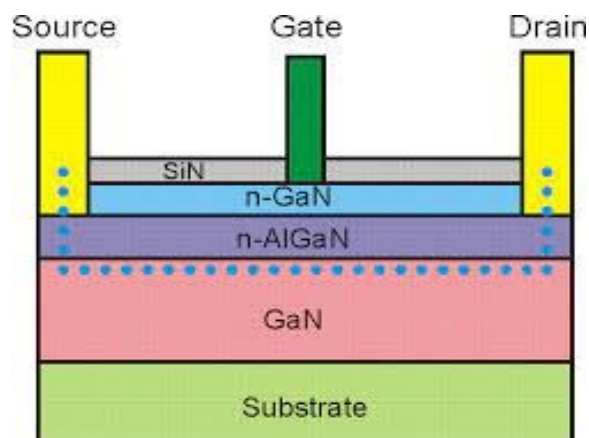


Figura 1.3: struttura non in scala di un HEMT AlGa_N/Ga_N [12]

L'immagine mostra molto bene il percorso eseguito dalle cariche libere nel dispositivo. La corrente, infatti, parte dal terminale di drain e giunge, tramite il 2DEG ottenuto all'interfaccia tra lo strato di GaN e lo strato di AlGa_N, al terminale di source venendo modulata grazie a una tensione applicata al terminale di gate costituito da un contatto Schottky. Il canale bidimensionale di elettroni su cui sono basati i dispositivi ad alta mobilità elettronica, però, ha anche degli svantaggi a livello pratico in quanto rende gli HEMT dei dispositivi normalmente accesi. Infatti nei dispositivi AlGa_N/Ga_N il 2DEG si manifesta tra source e drain anche quando la tensione di gate V_G è nulla a causa del valore assunto dal livello di Fermi rispetto a quello della banda di conduzione in corrispondenza dell'interfaccia dell'eterostruttura [7].

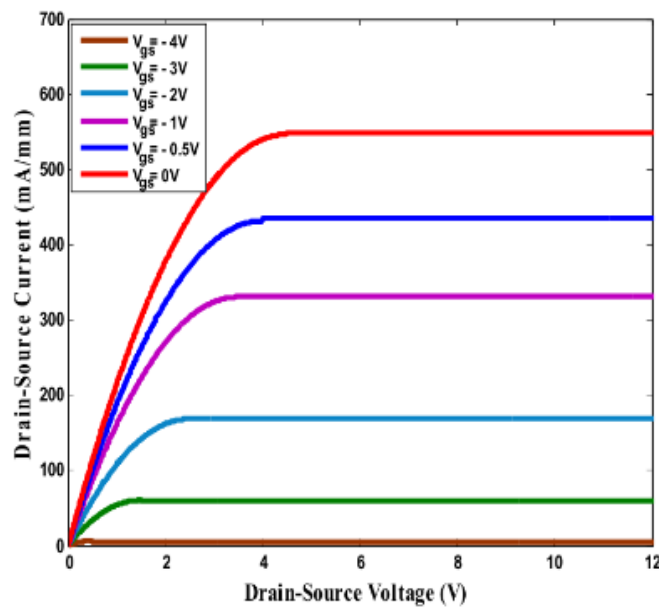


Figura 1.4: Caratteristica di uscita di un GaN HEMT, notare che per spegnere il dispositivo è necessaria una tensione di gate negativa [12]

Nell'elettronica di potenza è molto importante per questioni di sicurezza che i dispositivi non siano in conduzione quando la tensione di gate è nulla. La particolarità di essere normalmente accesi dei dispositivi HEMT e quindi di avere una tensione di soglia negativa V_{th} , è stato un aspetto che ha ostacolato la diffusione di tali dispositivi ma che si può ritenere superato grazie allo sviluppo dei dispositivi GaN normalmente off. Altri aspetti che hanno ostacolato il successo del GaN e la sua diffusione su larga scala, sono quelle criticità legate alle difficoltà nell'ottenere

un cristallo di nitruro di gallio con poche impurità grazie a un processo produttivo sostenibile economicamente e che implementi delle lavorazioni funzionali che non degradassero le proprietà del semiconduttore.

1.4 Dispositivi GaN normalmente on

I transistor ad alta mobilità elettronica al nitruro di gallio sono realizzati grazie ad una eterostruttura che prevede una parte di GaN drogata con atomi di alluminio. Come si è già trattato nei paragrafi precedenti, i dispositivi al GaN, a causa del canale bidimensionale di elettroni, innescato dalla necessità di compensare il campo di polarizzazione spontanea caratteristico del nitruro di gallio e il campo di polarizzazione piezoelettrica dovuto dallo stress reticolare dovuto dalla crescita del cristallo in AlGaN sul substrato di GaN, sono normalmente on e quindi sono in conduzione anche senza l'applicazione di una tensione di gate. Al fine di una più completa comprensione del 2DEG è utile la visualizzazione dei livelli delle bande di energia nelle strutture AlGaN/GaN dei HEMT. Nella figura 1.5 si ha una rappresentazione dei livelli energetici di: banda di conduzione E_c , livello di fermi E_f e banda di valenza E_v di AlGaN e GaN. Essendo una eterostruttura è comprensibile che i valori energetici e l'energy gap siano differenti oltre l'interfaccia.

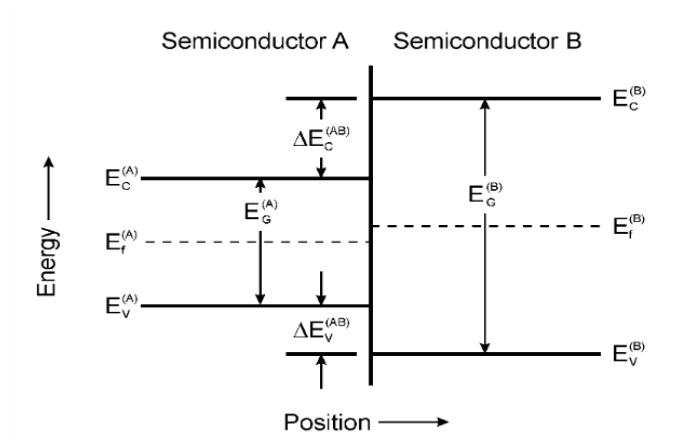


Figura 1.5: Diagramma livelli energetici AlGaN/GaN, il semiconduttore A è AlGaN mentre il B è GaN

Lo strato di AlGaN cresciuto sul substrato di GaN introduce all'interfaccia un accumulo di carica positiva e un accumulo di carica negativa sulla sua parte superiore. Tale distribuzione di carica causa la presenza di un campo elettrico

all'interno dello strato AlGaN drogato n che provoca una inclinazione verso il basso di tutti i suoi livelli energetici. A causa del campo elettrico inizierà un moto di cariche positive verso le cariche negative, e vice-versa, che riequilibrerà i vari livelli energetici lungo tutto l'AlGaN come mostrato in figura 1.6.

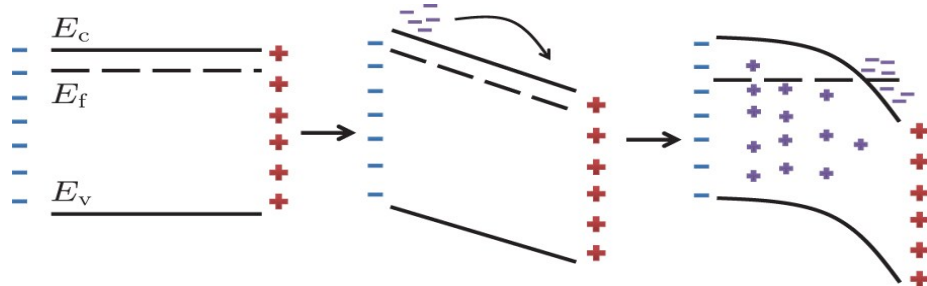


Figura 1.6: Distribuzione e redistribuzione di carica in AlGaN drogato n

Riconsiderando anche la parte di cristallo di GaN oltre l'interfaccia AlGaN/GaN, è evidente che il livello energetico di Fermi dell'AlGaN è maggiore di quello del GaN e che gli elettroni accumulati all'interfaccia migreranno dallo strato inferiore dell'AlGaN allo strato superiore oltre l'interfaccia col GaN, così da ottenere nuovamente un E_F piatto e costante lungo tutta l'eterostruttura. Questo processo di ricombinazione è il fenomeno che causa la formazione del pozzo quantico, dove vengono intrappolati gli elettroni ad alta mobilità e si forma il canale elettronico bidimensionale (2DEG). Il processo è rappresentato in fig. 1.7 [13].

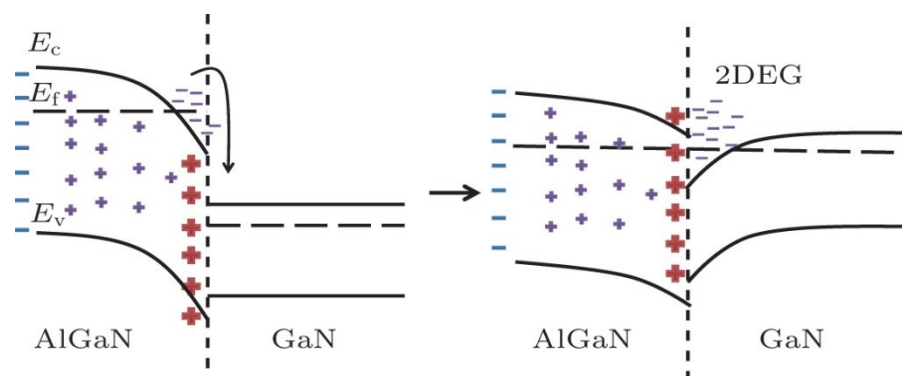


Figura 1.7: Distribuzione di carica e riequilibrio dei livelli energetici di un AlGaN drogato n adagiato su buffer di GaN

In fig. 1.8 è rappresentato un HEMT isolato e quindi normalmente on.

L'illustrazione mostra molto bene la sua tipica struttura, infatti, lo strato inferiore

del dispositivo è costituito da Silicio per attenuare la tensione causata dal mismatch reticolare dell'eterostruttura AlGaN/GaN. Sul Silicio si adagia il substrato di GaN per poi trovare uno strato involontariamente drogato di GaN (UID-GaN) che è di tipo n, un distanziatore costituito da AlGaN così da ottenere l'eterogiunzione desiderata e infine una barriera di AlGaN molto più spessa del distanziatore. La prossimità del UID-GaN è il sito del 2DEG che è causa di una corrente ad alta intensità che va dal terminale di source al terminale di drain. Per riuscire ad interrompere il flusso di carica normalmente attivo di tali eterostrutture e poter spegnere il dispositivo è necessario dotare il HEMT di un gate Schottky (diode Schottky) che si comporta come un diodo che, a livello ideale, quando è polarizzato direttamente permette il passaggio di corrente mentre quando è polarizzato inversamente interrompe il flusso. L'utilizzo di un gate Schottky permette di spegnere il dispositivo applicando una tensione negativa al gate adeguata concedendo comunque un'alta frequenza di commutazione desiderata nei HEMT.

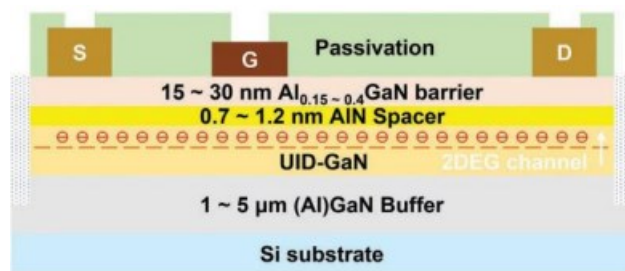


Figura 1.8: Struttura HEMT normalmente on [5]

È evidente che nel mondo dell'elettronica un dispositivo normalmente on rappresenta un ostacolo all'affidabilità e alla sicurezza del circuito in cui il componente viene impiegato, è stato quindi necessario riuscire a rendere gli HEMT normalmente off mediante tecniche e modifiche ingegneristiche per renderli commercializzabili.

1.5 Dispositivi GaN normalmente off

I dispositivi GaN normalmente off sono i dispositivi maggiormente usati nell'elettronica di potenza poiché sono più sicuri e più semplici in termini di circuiti gate-driver. Fisicamente, per provocare un aumento della tensione di soglia V_{th} , condizione necessaria per il comportamento normalmente off dei HEMT, bisogna modificare l'area vicino al gate opportunamente.

Varie tecniche sono state utilizzate per ottenere ciò. Una prima soluzione fu il cosiddetto approccio “recessed gate” detto anche ultrathin o a barriera sottile [14]. Questo si basava sull’assottigliamento locale della barriera di AlGaN al di sotto del gate. Infatti, al di sotto di un certo spessore dello strato di AlGaN, il livello di Fermi all’interfaccia risulta essere inferiore al minimo della banda di conduzione dell’AlGaN, causando così lo svuotamento del 2DEG e una tensione di soglia V_{th} positiva.

Un ulteriore approccio fu il “fluorine gate”. Questo prevedeva, attraverso plasma o processi di impiantamento ionico, l’inserimento di ioni di fluoro carichi negativamente al di sotto dell’elettrodo di gate. La carica negativa inserita causava un cambiamento positivo della tensione di soglia e una riduzione del 2DEG. In aggiunta, gli ioni di fluoro introdotti, corrispondenti a cariche fisse negative, generavano un aumento della banda di conduzione dell’AlGaN e un conseguente ampliamento dell’altezza della barriera metallo/AlGaN, causando così una minore corrente di dispersione del gate. Una successiva evoluzione fu la combinazione dei due approcci precedenti. In particolare, sotto al gate metallico nell’area “sospesa” fu introdotto uno strato dielettrico così da diminuire la corrente di dispersione. In questo modo, variando lo spessore dello strato di dielettrico era possibile un migliore controllo della tensione di soglia.

I metodi sopra descritti furono i primi ad essere adottati, ma presentarono presto limiti significativi in termini di riproducibilità a livello nanometrico nell’incisione del plasma. Per questa ragione, gli approcci ad oggi maggiormente utilizzati per ottenere dispositivi GaN normalmente-off sono i seguenti:

1. configurazione Cascode;
2. p-GaN gate;
3. recessed gate hybrid MISHEMT.

1.5.1 Configurazione Cascode

La configurazione Cascode fig 1.9, detta anche a cascata, consiste nella realizzazione di un circuito ottenuto collegando in serie un HEMT GaN normalmente on ad alta tensione con un MOSFET al Si normalmente off a bassa tensione. Il circuito ottenuto dai due dispositivi in serie è realizzato in modo tale che la V_{DS} del MOSFET piloti il gate e determini la V_{GS} del dispositivo GaN. Se il MOS riceve una tensione di gate positiva superiore alla sua tensione di soglia entra in

conduzione e la tensione tra il gate e il source dell'HEMT diventa nulla quindi il dispositivo GaN essendo normalmente on è in conduzione e l'intero circuito è in funzione. Invece se la tensione al gate del MOSFET non è abbastanza alta da superare la sua tensione di soglia il MOSFET è off e non mostra passaggio di corrente tra i propri terminali di source e drain, causando una tensione V_{GS} ai capi dell'HEMT inferiore alla sua tensione di soglia portando alla chiusura del 2DEG e allo spegnimento del dispositivo GaN.

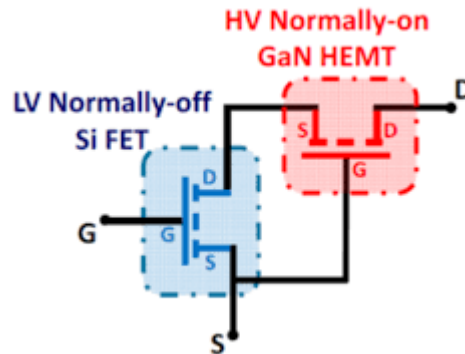


Figura 1.9: Circuito HEMT GaN in configurazione cascode con MOSFET Si [1]

Con questa configurazione si riesce quindi ad ottenere un dispositivo normalmente off con una tensione di soglia maggiore di zero che dipende dalla V_{th} del MOSFET in Si, mantenendo così i vantaggi caratteristici dei dispositivi ad alta mobilità elettronica al GaN. Infatti, è da tempo si possono trovare sul mercato dispositivi che utilizzano tale tecnica. Il fatto che il metodo cascode sia un approccio diretto per ottenere dei HEMT normalmente off ha però degli svantaggi che hanno spinto la ricerca a sviluppare circuiteria al GaN che sia “veramente” normalmente off. Gli aspetti negativi di questa metodica sono dettati dal fatto che la presenza di un MOSFET aggiuntivo rende il componente più ingombrante. Il circuito più complesso introduce induttanze parassite peggiorando le prestazioni. Le temperature di esercizio sono limitate in quanto il MOSFET è in Silicio e tollera temperature di esercizio inferiori del nitruro di gallio. Un altro aspetto è legato a quanto la R_{ON} del dispositivo HEMT è più grande rispetto a quella del FET perché maggiore è la tensione di rottura V_B maggiore è la R_{ON} del dispositivo. Questo vuol dire che se la tensione di Breakdown non è molto alta allora la resistenza di on del HEMT sarà paragonabile a quella del MOSFET e quindi la presenza del FET causerà un aumento della resistenza all'avvio del circuito considerevole. Per questi motivi la configurazione cascode non è l'ideale nel mondo dell'elettronica ma si ritiene che

possa comunque essere adatta per applicazioni che prevedono tensioni superiori a 200 V.

1.5.2 Gate p-GaN

Drogare il GaN con il magnesio, o altri elementi simili, permette di arricchire il semiconduttore di lacune e quindi di ottenere del GaN di tipo p. Dotare un HEMT di un gate di tipo p-GaN è tutt'ora una delle soluzioni più utilizzate per ricavare dei dispositivi al nitruro di gallio normalmente spenti. La sostituzione del gate Schottky, presente tipicamente negli HEMT normalmente on, con un gate p-GaN, permette di spostare il livello di Fermi dell'AlGaN al di sotto della banda di conduzione, innescando così l'esaurimento del 2DEG e rendendo l'HEMT normalmente off, ossia, un dispositivo che per essere in funzione e ripristinare il canale elettronico tra source e drain necessita di una tensione positiva. La fig. 1.10 mostra un confronto tra la struttura e il diagramma a bande di un HEMT normalmente on con quelle di un HEMT con gate p-GaN.

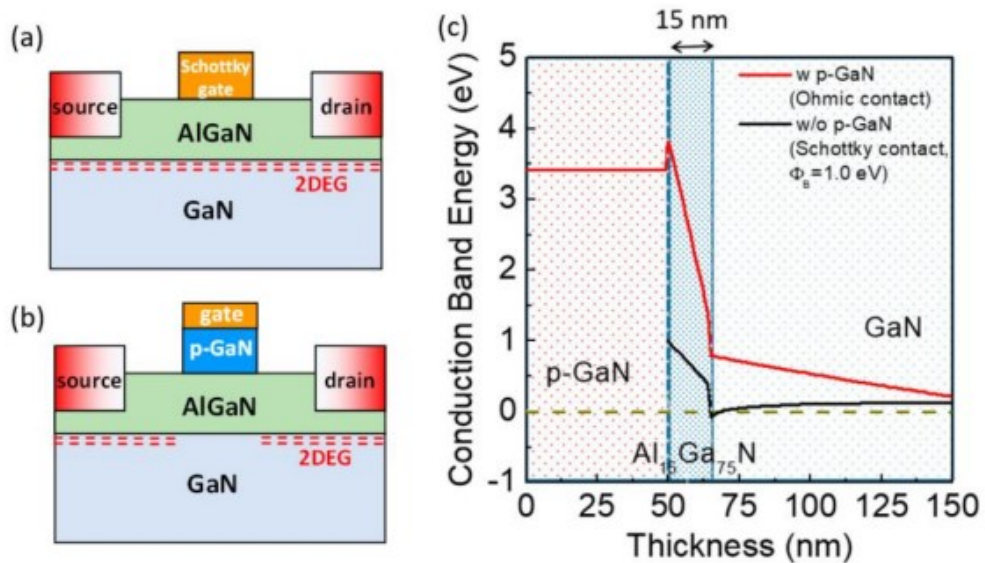


Figura 1.10: a) Struttura HEMT normalmente on; b) Struttura HEMT con gate p-GaN normalmente off; c) Confronto diagramma di bande di energia dei due dispositivi, linea rossa HEMT p-GaN e linea nera HEMT normalmente on con gate Schottky [1]

Come si può notare nella fig. 1.10 la presenza del gate p-GaN è in grado di interrompere il canale elettronico bidimensionale. Per riuscire a spostare di un offset adeguato i livelli energetici e portare quindi la V_{th} a valori superiori allo zero è necessario, però, che l'eterostruttura AlGaN/GaN abbia: uno spessore della barriera

AlGa_N di 10-15 nm, una concentrazione di alluminio del 15-20% e che il gate p-GaN abbia un livello di drogatura superiore a 10^{18} cm^{-3} [1]. Se il livello di drogaggio del p-GaN non può essere modificato, è importante incrementare l'attivazione elettrica del Magnesio, sfruttando determinati parametri di crescita del p-GaN e condizioni di ricottura che permettano di salvaguardare la concentrazione del elemento accettore nel semiconduttore e evitino che durante il trattamento termico non avvengano reazioni tra il Mg e l'eventuale idrogeno presente nell'atmosfera, in quanto ridurrebbe le lacune presenti nel materiale che sono fondamentali per la deflazione del 2DEG.

Un altro fattore che influenza la tensione di soglia dei HEMT è il tipo di contatto metallico utilizzato nel gate p-GaN e l'altezza della sua barriera Schottky. Inizialmente la scelta di un contatto ohmico in Palladio effettuata da Y. Uemoto e altri ha permesso di migliorare l'iniezione di lacune e la capacità di corrente, per questo motivo si è nominato il dispositivo con gate p-GaN anche con il nome di "gate injection transistor" (GIT) [16]. Successivamente, però, sono state effettuate da I. Hwang e altri delle simulazioni TCAD (technology computer-aided design) sugli HEMT con gate p-GaN, che hanno messo in evidenza che, rispetto a un gate ohmico, un gate Schottky metallico sul p-GaN porta ad una tensione di soglia maggiore, a minor perdite di gate e quindi a consumi inferiori e a minor riscaldamento in esercizio [17]. Negli ultimi anni sono stati testati dalla R&S diversi materiali come contatti di gate Schottky, ma al momento quello che sembra essere il migliore è il nitruro di titanio (TiN) in quanto: è un materiale stabile a livello termico e chimico; è compatibile ad una lavorazione di patterning auto-allineato che permette di incidere il gate metallico in un'unica sequenza sul p-GaN e permette di raggiungere tensioni di soglia fino a 2.1 Volt nei p-GaN HEMT. Le modalità di fabbricazione dei dispositivi però hanno evidenziato delle problematiche sulla scelta del gate al TiN, in quanto la ricottura del gate ad una temperatura di 800°C modifica l'altezza della barriera Schottky e aumenta la corrente di dispersione rendendo il dispositivo meno affidabile. Per questo motivo si preferiscono i processi produttivi di questi dispositivi che non raggiungono alte temperature, che possono portare alla degradazione delle qualità elettriche del componente. Un altro punto critico inerente alla fabbricazione di questa tecnologia è legato al fatto che, per ottenere dei HEMT p-GaN normalmente off, è necessario effettuare un'operazione di rimozione a secco selettiva dello strato di p-GaN tramite l'incisione al plasma, in quanto è una

lavorazione molto delicata e che deve avvenire con estrema precisione se non si vuole rischiare di deteriorare le proprietà di conduzione del dispositivo, in prossimità delle regioni di accesso. Tuttavia, si stanno sviluppando negli ultimi anni delle tecniche di lavorazione alternative all'incisione a secco del p-GaN, alcune molto interessanti sono la crescita selettiva del gate di p-GaN [18] e il trattamento del p-GaN con plasma a idrogeno. Quest'ultima è risultata molto interessante in quanto grazie alla reazione che coinvolge l'idrogeno del plasma con il magnesio del p-GaN, si innesca una passivazione del magnesio che porta ad un aumento della resistività dell'area di gate e permette di ottenere HEMT normalmente off in p-GaN con una tensione di rottura elevata e una corrente di dispersione migliorata grazie all'assenza di incisione [19].

Sebbene abbia ancora dei difetti, il modello p-GaN ha mostrato risultati davvero convincenti, infatti H. Jiang e altri sono riusciti a implementare un HEMT normalmente off in configurazione p-GaN con una V_{BR} fino a 1344 V a una I_D di $1 \mu A/mm$ [20]. La caratteristica di trasferimento del loro dispositivo, mostrata in fig. 1.11, ha evidenziato: una tensione di soglia V_{TH} di 1.6 V in corrispondenza di una corrente di drain di $10 \mu A/mm$ e, per valori di V_{GS} fino a 8 V, una corrente di leakage gate I_G di solo 1 mA/mm e una I_{Dmax} di 450 mA/mm

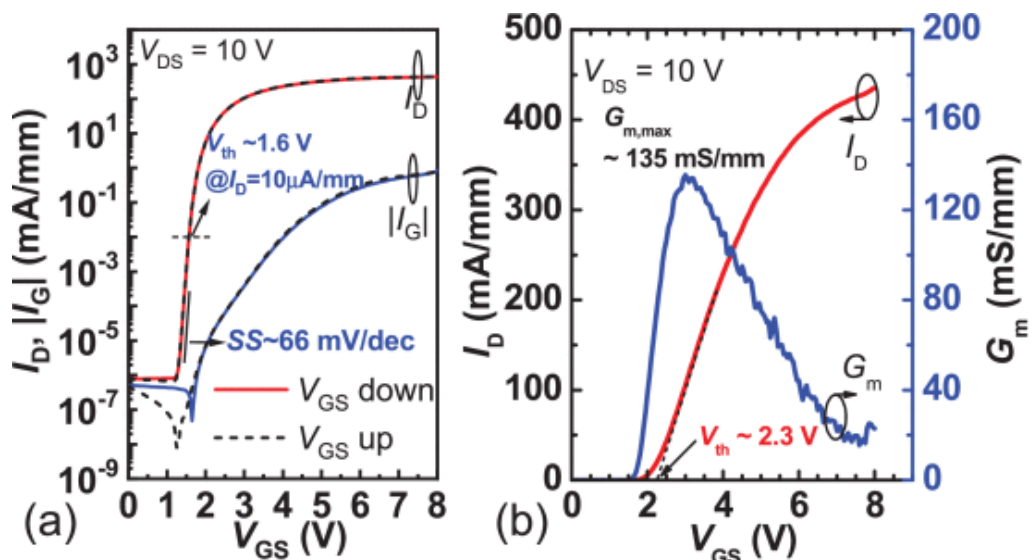


Figura 1.11: Caratteristica di trasferimento di un HEMT p-GaN; a) scala semilogaritmica; b) scala lineare [20]

In fig. 12 invece si rappresentano le curve di caratteristica di uscita del dispositivo ottenute variando la V_{GS} da 0 V a 8 V con incrementi di 1 volt per volta. La sua resistenza di on è risultata di $14 \Omega \cdot mm$ il che si traduce in un valore specifico R_{ONSp} di $3.92 m\Omega$.

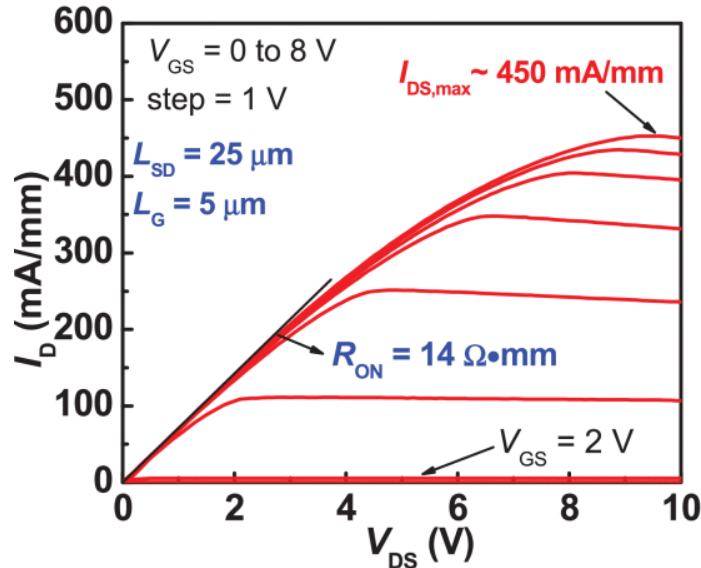


Figura 1.12: Caratteristica di uscita HEMT p-GaN [20]

Il dispositivo mostra quindi una elevata tensione di rottura e una resistenza di on specifica accettabile il che gli consente di avere un valore della figura di merito BFOM di $461 MW/cm^2$ che è sicuramente un ottimo risultato e che dimostra le enormi potenzialità degli HEMT in p-GaN e nel permettere l'implementazione di dispositivi in grado di garantire ottime prestazioni a costi contenuti [20].

Per questo motivo, la configurazione con gate p-GaN, è una tecnologia che è stata in grado di cambiare le prospettive future del nitruro di gallio nell'elettronica di potenza e rappresenta, ad oggi, l'unica soluzione in grado di ottenere dei transistor in GaN ad alta mobilità elettronica "veramente off" presente sul mercato [21].

1.5.3 Recessed gate hybrid MISHEMT

Il MISHEMT hybrid recessed gate è un dispositivo che può rientrare nella classe dei transistor ibridi ed è costituito da un canale MIS (metallo-isolante-semiconduttore), collegato in serie alle due regioni di accesso in cui si manifesta il canale elettronico bidimensionale. Partendo da un HEMT il MISHEMT è ottenuto rimuovendo lo strato di barriera di AlGaIn in prossimità del gate con una lavorazione di incisione al

plasma e passivando con un isolante la regione di GaN incassata. La fig. 1.13 ne rappresenta la sua struttura.

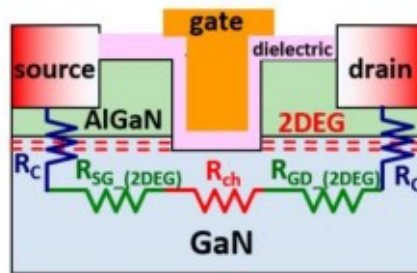


Figura 1.13: Struttura MISHMET ibrido a gate incassato compreso di contributi resistivi [1]

La ricerca è riuscita a sviluppare un MISHMET con una tensione di soglia di 2 V, una resistenza all'avvio specifica inferiore a $10 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ e una tensione di rottura dell'ordine dei kV [22] [23], dimostrando le potenzialità di questa configurazione nell'elettronica di potenza, configurazione che a differenza del gate p-GaN, non è ancora diffusa sul mercato.

Fattori come: la presenza di difetti, la rugosità della superficie incisa e le proprietà elettriche dell'isolante del gate influenzano la mobilità elettronica del dispositivo, poiché alterare la mobilità degli elettroni si traduce in una variazione della resistenza R_{ON} di questi dispositivi. Facendo riferimento alla struttura del MISHMET in fig. 1.13 si può definire la resistenza all'avvio totale come:

$$R_{ON} = 2R_C + R_{RSG} + R_{RGD} + R_{ch}$$

Con:

- R_C resistenza di contatto degli elettrodi tra source/drain;
- R_{RSG} e R_{RGD} contributo alla resistenza di accesso;
- R_{ch} resistenza della regione del canale.

L'andamento di R_{ON} in funzione della mobilità di canale μ_{ch} è rappresentato in fig. 1.14.

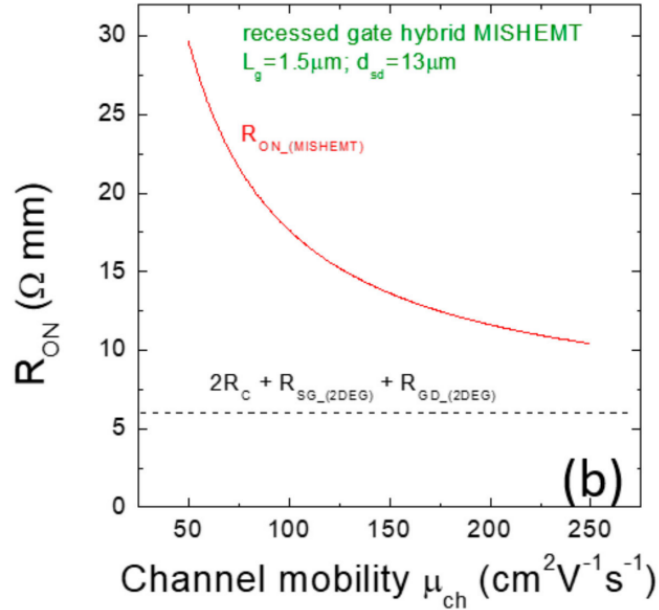


Figura 1.14: Andamento della R_{ON} in funzione della mobilità di canale [1]

La regione più critica in questa configurazione è l'interfaccia isolante/GaN nel recessed gate e non è un caso che sia la zona dei MISHEMT in continua fase di sviluppo in quanto la supervisione delle proprietà del gate incassato è fondamentale per cercare di ottimizzare la mobilità del canale e minimizzare la resistenza all'avvio del dispositivo. Un parametro tipicamente usato per rappresentare il comportamento del canale di un MISHMET ibrido a gate incassato è la mobilità a effetto di campo μ_{FE} :

$$\mu_{FE} = \frac{L_g}{WC_{ox}V_{DS}} \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}$$

con: C_{ox} capacità dell'isolante di gate per unità di area, L_g lunghezza di canale, W larghezza di canale, I_{DS} corrente di drain e V_{GS} tensione tra gate e source.

Per ottenere una bassa resistenza di on, al fine di migliorare l'efficienza e ridurre la dissipazione di potenza, è necessaria un'alta mobilità di effetto di campo. È importante precisare però che la mobilità dipende anche dalla tensione al gate in quanto oltre determinati valori di V_{GS} la μ_{FE} raggiunge un picco di massimo per poi decrescere. Per cercare di massimizzare la mobilità del dispositivo si sono testati diversi dielettrici. I materiali più usati ad oggi sono: SiO_2 , Al_2O_3 e SiN_x . Si è notato che oltre al tipo di materiale utilizzato come dielettrico nei MISHET ibridi con recessed gate, la mobilità, quindi anche la dissipazione di potenza, è influenzata anche dalla: modalità di deposizione dell'isolante soprattutto se effettuata ad alte temperature, dai processi post-cottura e dalla preparazione della superficie del canale. I tre dielettrici elencati avendo tecniche di deposizione sulla struttura e geometrie

molto diverse tra di loro risultano difficilmente confrontabili direttamente, uno studio però [24] ha mostrato la correlazione tra la mobilità del canale con fattori che dipendono dalle caratteristiche fisiche dell'interfaccia isolante/GaN come: rugosità superficiale, drogaggio, trappole d'interfaccia ecc. Sfruttando la correlazione diretta tra il picco della mobilità e la temperatura hanno dimostrato che i parametri limitanti più importanti per il moto dei portatori nel canale sono la rugosità della superficie e il contributo dello scattering fono-acustico e di Coulomb il che vuol dire che a parità di altre condizioni, dotando l'interfaccia isolante/GaN dei MISHEMT di una migliore rugosità superficiale e di una minore densità di trappole, si riesce ad ottenere nel dispositivo una: mobilità superiore, una resistenza all'avvio più bassa e una minor perdita di potenza. Oltre al problema della R_{ON} , un altro aspetto che rappresenta una problematica considerevole di questa tecnologia e che sta rallentando la sua diffusione nel mercato, è l'instabilità della tensione di soglia causata da polarizzazioni positive o negative che portano all'intrappolamento o al de-intrappolamento della carica nell'isolante del gate. Ciò è un difetto rilevante in quanto oltre a portare ad una degradazione della resistenza di on rende il funzionamento normalmente off del dispositivo meno affidabile e sicuro [7].

1.5.4 Conclusioni sulle configurazioni normalmente off elencate

La natura caratteristica dei dispositivi GaN di essere normalmente on, quindi attivi anche in condizioni di polarizzazione nulla, rappresenta uno svantaggio ingombrante ai fini del loro impiego effettivo nell'industria dell'elettronica di potenza, in quanto per questioni di sicurezza e affidabilità è necessario che gli HEMT siano spenti in assenza di una tensione al gate. Riuscire a ottenere dispositivi normalmente spenti al GaN è per cui fondamentale se si vogliono migliorare notevolmente i consumi e le prestazioni dei sistemi elettronici salvaguardando anche l'importantissimo aspetto della loro sicurezza.

Le metodiche per ottenere degli HEMT normalmente off che ci sono trattate in dettaglio sono: la configurazione cascode, il gate p-GaN e il MISHMET ibrido con gate incassato. Nella tabella 1.3 si riassumono gli aspetti positivi e negativi dei tre design normalmente off proposti.

configurazione	Pro	Contro
Cascode	Sfrutta MOSFET in Si standard; Tensione di soglia V_{th} stabile fornita dal MOSFET in Si.	Dimensioni e complessità dell'involucro del dispositivo; richiede il settaggio di ogni MOSFET in Si presente nella configurazione; poco adatto a tensioni sotto i 600 V e a frequenze minori di 1MHz.
Gate p-GaN	Resistenza di canale ridotta; Il dielettrico non è causa di problematiche.	Incisione del p-GaN da ottimizzare per ottenere un dispositivo affidabile e con adeguata resistenza all'avvio; ridotta oscillazione della tensione positiva al gate.
MISHEMT ibrido a gate incassato	Alta tensione di rottura; permette una modalità di controllo dei dispositivi standard	Poco adatto per l'utilizzo a bassa tensione (100 V); l'influenza dell'interfaccia isolante/GaN sulle performance del dispositivo (R_{ON} e affidabilità).

Tabella 1.3: Riassunto in tabella dei vantaggi e degli svantaggi delle soluzioni HEMT normalmente off [1]

Il confronto dei tre approcci evidenzia che, nonostante sia abbastanza efficace ai fini di ottenere nei dispositivi GaN con una tensione di soglia sufficientemente positiva, la configurazione a cascata non rende intrinsecamente un HEMT normalmente off come richiede invece l'attuale mercato. Per questo motivo anche se i dispositivi GaN in "cascode" sono già presenti in commercio le altre due soluzioni proposte sono più interessanti e mostrano un potenziale superiore, nonostante al momento la tecnologia MISHMET sia ancora in fase di

sviluppo e, di fatto, l'unico approccio che si possa considerare pronto a tutti gli effetti e già implementato con successo in prodotti elettronici commerciali, sia l'approccio con gate p-GaN. Tuttavia, come ricorda la tabella [1.3], anche il p-GaN presenta ancora dei difetti che non sono trascurati e di cui la R&S si sta impegnando a risolvere o a mitigare, cercando di sviluppare, sia per i p-GaN che per i MISHEMT, materiali migliori a costi sostenibili e processi di lavorazione innovativi e più efficaci, così da poter produrre HEMT normalmente off più affidabili, performanti e sicuri.

Confrontando il MISHEMT con il p-GaN è evidente che entrambe le tecnologie mostrino delle caratteristiche, positive e negative, che rendono la scelta tra le due configurazioni influenzata notevolmente dal tipo di applicazione prevista. I risultati infatti fanno intendere che i MISHEMT siano maggiormente adatti per condizioni di esercizio che prevedono alte tensioni mentre i pGaN per condizioni di lavoro caratterizzate da basse e medie tensioni [1].

1.6 Metodiche di fabbricazione dei dispositivi GaN a basso danneggiamento

Le caratteristiche dei dispositivi GaN sono influenzate dai processi produttivi necessari per la loro fabbricazione in modo più o meno significativo a seconda della metodica adottata. Per ridurre gli effetti negativi introdotti nel materiale a causa del loro processo produttivo si sono sviluppate le seguenti tecniche di lavorazione destinate principalmente ai HEMT normalmente off:

- Incisione digitale;
- Strained engineering;
- Crescita selettiva del Gate p-GaN.

1.6.1 Incisione digitale

Una volta ottenuta un'eterostruttura a base di GaN di dimensioni adatte per riuscire a costruire un HEMT è necessario rimuovere dalla struttura gli strati indesiderati e conservare invece le regioni desiderate. Una lavorazione in grado di adempiere a tale compito sulle strutture GaN e AlGaN è la tecnica di incisione selettiva. Questo processo è da molti anni tenuto molto in considerazione per la produzione di HEMT normalmente off sia in configurazione gate p-GaN e sia in configurazione MISHEMT. Tuttavia, la difficoltà di controllo del processo di rimozione delle zone indesiderate e la necessità ridurre il di danneggiamento superficiale del materiale ha spinto la ricerca allo sviluppo di un'incisione auto-limitante e a basso danno chiamata incisione digitale. L'incisione digitale consiste nel sottoporre la barriera di gate ad una sequenza ciclica che prevede l'ossidazione con plasma O_2 e la rimozione dello strato

ossidato, con acidi come l'acido cloridrico HCl, che permette l'asportazione dello strato di ossido ottenuto in circa 90 secondi. Ogni ciclo consente di rimuovere una quantità costante di layer atomici e questo rende l'incisione digitale controllabile molto bene [25]. Il processo nel dettaglio sia per i p-GaN che per i MISHMET è rappresentato dalla fig. 1.15 e mostra la seguente sequenza:

1. Una superficie di ossido di silicio di 100 nm^2 è adagiata in modo tale da ottenere uno strato coprente chiamato anche maschera, sulla struttura;
2. Mediante un primo ciclo di incisione tramite una fase di ossidazione e una di rimozione dell'ossido si va a rimuovere le regioni della struttura interessate conservando l'integrità delle regioni evitate dall'incisione;
3. La ripetizione del ciclo di incisione fino a quando non si è ottenuta la struttura desiderata;
4. La rimozione della maschera in SiO_2 .

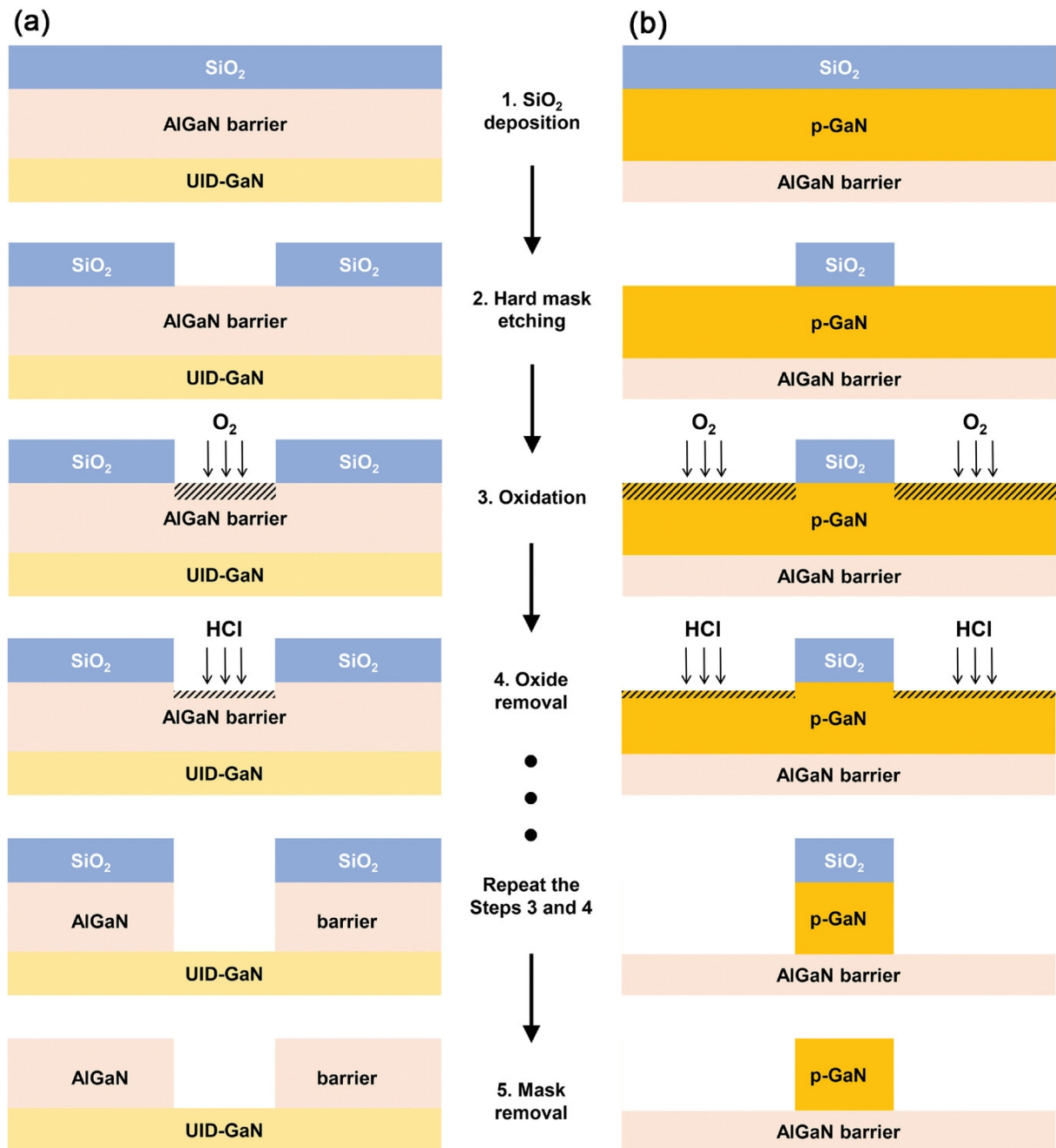


Figura 1.15: a) Incisione digitale per MISHEMT; b) Incisione digitale per p-GaN [14]

L'aspetto legato alla sequenza ciclica rende poco applicabile l'incisione digitale alla produzione di massa. Infatti, anche se l'incisione digitale è una tecnica che consente velocità e un ottimo controllo, per il momento rimane ancora confinata ad un utilizzo di tipo accademico.

1.6.2 Strained engineering

La ricerca per ottenere una tecnica di lavorazione che fosse anche applicabile nell'industria di massa ha portato allo sviluppo dell'ingegneria di deformazione, la quale ha permesso la fabbricazione di HEMT normalmente off senza la necessità di applicare incisioni. Sfruttando

la natura piezoelettrica del GaN è possibile ingegnerizzare, grazie allo strato di passivazione in SiN (maschera), il 2DEG con lo scopo di aumentare la tensione di soglia fino a adeguati valori positivi, in modo da riuscire a costruire HEMT normalmente off eliminando il rischio di causare i danni superficiali tipici delle incisioni. Tale processo è reso possibile tramite la variazione del ciclo di lavoro delle frequenze di eccitazione del plasma durante la deposizione della maschera, in quanto permette di gestire lo stress causato dallo strato di SiN posizionato sulla struttura. La deformazione che il SiN introduce sul dispositivo, va a sottoporre l'eterostruttura ad uno stato tensionale che mette in sollecitazione il cristallo, innescando così l'effetto piezoelettrico caratteristico del GaN portando ad un aumento della V_{th} del dispositivo. La ricerca sperimentale di Wei Chih Cheng e altri [26] ha permesso di ottenere, su dispositivi con una lunghezza di canale di $l_{Lg} = 0.1 \mu m$, un aumento di circa un Volt della tensione di soglia grazie all'ausilio di un rivestimento SiN_x di compressione. È vero, che per un funzionamento affidabile e sicuro ad alte potenze, è necessario raggiungere dei livelli di V_{TH} negli HEMT più elevati di quelli ottenuti attualmente con tale approccio. Tuttavia, lo studio effettuato da Wei Chih Cheng ha dimostrato le potenzialità dell'ingegneria di deformazione nella costruzione di HEMT GaN/AlGaIn normalmente off e messo delle ottime basi per la ricerca e lo sviluppo di tale metodica.

1.6.3 Crescita selettiva del gate p-GaN

La difficoltà nell'evitare danneggiamenti da incisione e nell'ottenere tensioni di soglia adeguatamente elevate, ha portato la comunità scientifica allo sviluppo di soluzioni alternative a quelle precedentemente elencate. Una di queste è la crescita epitassiale selettiva del p-GaN. Le proprietà dello strato cresciuto e quindi il risultato di questo processo tecnologico dipendono da più fattori come: la natura e la geometria dello strato di maschera rigida, la temperatura di crescita e la pressione del reattore [27]. Il processo produttivo per la crescita selettiva dell'area è rappresentato in fig. 1.16 e prevede:

1. La deposizione della maschera in SiO_2 ;
2. La rimozione selettiva della maschera;
3. La crescita selettiva della barriera nelle zone adiacenti alla porzione di maschera conservata così da formare una regione a gate incassato senza incisione;
4. La rimozione della porzione di maschera rimasta;
5. La deposizione del dielettrico per il gate;
6. La deposizione del metallo sulle regioni destinate ai terminali di drain e source.

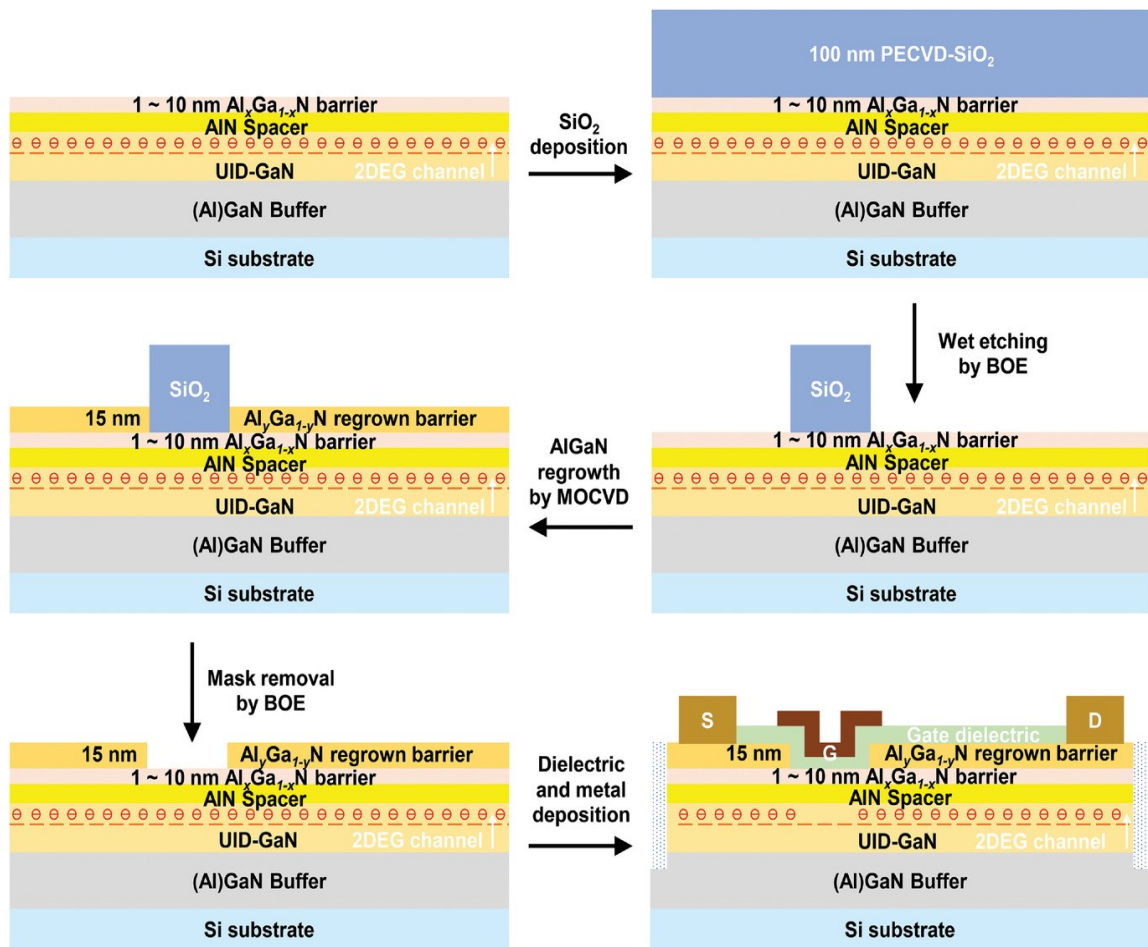


Figura 1.16: Processo di crescita selettiva dell'area [14]

L'assenza di incisioni consente di ottenere un'ottima rugosità superficiale e quindi una migliore mobilità e una minore resistenza all'avvio, inoltre diversi studi hanno dimostrato che con la tecnica di crescita selettiva dell'area è possibile costruire HEMT normalmente off al GaN con tensioni di soglia che vanno dai 2.5 V fino anche ai 5 V [28] [14].

Capitolo II

TECNICHE PROGNOSTICHE E DIAGNOSTICHE DEI DISPOSITIVI GAN E CONDITION MONITORING

2.1 Introduzione al condition monitoring

Il condition monitoring (CM) è una procedura che permette di monitorare un sistema fisico rilevando le variazioni di determinati parametri, controllati al fine di prevedere i guasti e programmare in maniera efficace gli interventi di manutenzione preventiva del sistema interessato. Il successo delle tecniche di condition monitoring è basato sulla conoscenza delle: circostanze di danneggiamento dei singoli componenti e dell'intero sistema integrato, della tecnologia dei sensori, dell'analisi dei dati e della capacità di stimare lo stato di integrità del sistema controllato. A livello pratico un processo di condition monitoring consiste nel quantificare in tempo reale le condizioni di un componente, così da poter attuare delle manovre cautelative preventivamente e tempestivamente prima che il sistema peggiori il suo stato di salute in modo irreversibile. Per dare un'idea ancora più chiara della definizione di CM è utile definire anche la fase di diagnosi e la fase di prognosi. La diagnosi è quel processo utile per l'identificazione delle cause responsabili del guasto, mentre la prognosi è quel processo utile per valutare il livello di salute attuale e cercare di prevedere quello futuro del sistema, sottoposto a determinate condizioni di esercizio.

Il controllo dello stato di salute dei componenti in tempo reale è un aspetto sempre più importante nelle applicazioni nell'elettronica di potenza, grazie al progresso tecnologico che ha caratterizzato: le conoscenze sulle modalità di guasto dei dispositivi elettronici, lo sviluppo dei sensori e dell'elaborazione dei segnali. Inoltre, certi sistemi critici in cui vengono adoperati i componenti elettronici devono garantire una sicurezza e un'affidabilità assoluta, è quindi di fondamentale importanza, la costante rilevazione dello stato di salute dell'elettronica del sistema. Trattandosi di tecnologia all'avanguardia, le caratteristiche inerenti all'affidabilità e all'ottimizzazione del funzionamento dei convertitori di potenza ad alta frequenza al GaN devono essere ancora ben determinate dalla ricerca scientifica. Infatti, l'applicazione delle metodiche di CM nel campo dell'elettronica di potenza, è ancora caratterizzato da complicazioni dovute alle difficoltà nel correlare in maniera efficace lo stato di usura o il tipo di guasto incipiente, con gli stati fisici rilevati dal monitoraggio [29].

2.2 Valutazione del grado di affidabilità dei dispositivi elettronici

L'affidabilità è la capacità di un prodotto o di un sistema di funzionare come previsto, cioè senza guasti ed entro i limiti di prestazione specificati, per un determinato periodo di tempo e in ambienti con stabilite condizioni. A differenza dei parametri tradizionali dell'elettronica di potenza come: efficienza, densità di potenza, distorsione armonica totale, ecc., l'affidabilità è un parametro difficile da quantificare e misurare in un dispositivo. Il primo approccio che ha permesso di valutare tale caratteristica, si è basato sulla raccolta di numerose quantità di dati, a livello di guasto per ogni componente, il che ha permesso la stesura di manuali basati sull'esperienza per determinare l'ipotetica durata di vita dei convertitori di potenza. Tale approccio è risultato però nella pratica poco efficace, in quanto, oltre a non identificare le modalità di guasto, ha spesso portato a valutazioni errate. Inoltre, a causa della scarsa quantità di dati relativi all'affidabilità della tecnologia GaN nell'elettronica di potenza, il metodo "da manuale" per la valutazione dell'affidabilità è ancora meno consigliato [30].

Uno degli aspetti che rende complesso effettuare una valutazione dell'affidabilità è che il guasto nei componenti causato dall'usura si manifesta, solitamente, in un lasso di tempo molto più lungo rispetto al tempo di vita utile del prodotto, quindi è necessario sottoporre il dispositivo, al fine di avere una valutazione della sua affidabilità in tempi ragionevoli, ad un test di vita accelerata (ALT), che fa da catalizzatore al processo di invecchiamento del sistema tramite particolari cicli termici o test specifici (Arrhenius).

Per effettuare delle predizioni di affidabilità accurate, è necessaria la determinazione e la comprensione della base fisica dei meccanismi di guasto, sia a breve che a lungo termine, dei dispositivi interessati. Per questo motivo le tecniche che sfruttano i metodi di estrapolazione di Arrhenius non risultano ottimali. Gli approcci più avanzati, infatti, sfruttano una serie di funzioni che permettono di considerare anche i profili di missione come: condizioni di alimentazione, di carico, di funzionamento e dell'ambiente rendendo la valutazione dello stato di affidabilità e l'identificazione del premonitore di guasto del dispositivo molto più precisa. Nell'analisi si tiene conto dei fattori che influenzano la velocità di degradamento dei componenti elettronici di potenza, come: la temperatura di conservazione, gli sbalzi di temperatura, l'umidità, le vibrazioni e l'entità dei parametri elettrici [31].

Una metodica alternativa ed efficace che permette di studiare l'affidabilità del prodotto considerando anche le condizioni di esercizio è quella della prognosi e gestione della salute PHM (Prognostics and health management). Tale tecnica, ampiamente discussa dalla comunità scientifica, consente, una volta individuato un precursore di guasto adatto all'applicazione desiderata come tensione, corrente, resistenza o temperatura, di monitorare

lo stato di salute di un sistema elettronico, di valutare il suo stato di degradamento e di effettuare una previsione della vita residua a determinate condizioni di esercizio [32]. La PHM è una prognosi che rientra nella categoria delle previsioni basate sulle condizioni CBM (condition based maintenance). La CBM rimane molto interessante in quanto consente un approccio alla manutenzione basato sul rilevamento in tempo reale delle anomalie effettuate durante il funzionamento, sfruttando le informazioni recepite dai sensori a disposizione. Le altre categorie di approccio nel CM sono: affidabilità a livello di componente, accumulo dei danni e l'analisi dei dati [33]. Nella CBM, la PHM accede ad una serie di dati che reperisce dal dispositivo controllato e utilizza come indicatori dello stato di salute del sistema. La continua estrapolazione di informazioni sul macchinario rende la tecnologia in PHM abile a definire un supporto decisionale per la manutenzione efficace del sistema sorvegliato. La sua abilità nell'analisi dei dati e nella definizione di un modello fisico permette di monitorare i processi di usura e di prevedere lo stato futuro del sistema. Inoltre, le funzioni digitali implementate nei dispositivi elettronici permetteranno di sviluppare una tecnologia PHM auto-adattiva (deep-learning) per l'analisi di affidabilità e condition monitoring dei macchinari elettronici di potenza [34]. In fig. 2.1 è rappresentato uno schema che riassume la metodologia generale della PMH usata dal CALCE (Center for Advanced Life Cycle Engineering), la quale comprende due parti principali che sono la valutazione della vita virtuale e la valutazione prognostica reale. Per effettuare la valutazione della vita virtuale si usano come input i dati di progettazione, il ciclo di vita di vita previsto, i FMMEA (failure modes mechanisms and effects analysis) e i modelli della fisica del guasto POF (physics of failure). Mentre per effettuare per la valutazione prognostica reale si sfruttano i dati raccolti in situ dai sensori, i dati di diagnostica e i registri di manutenzione [30].

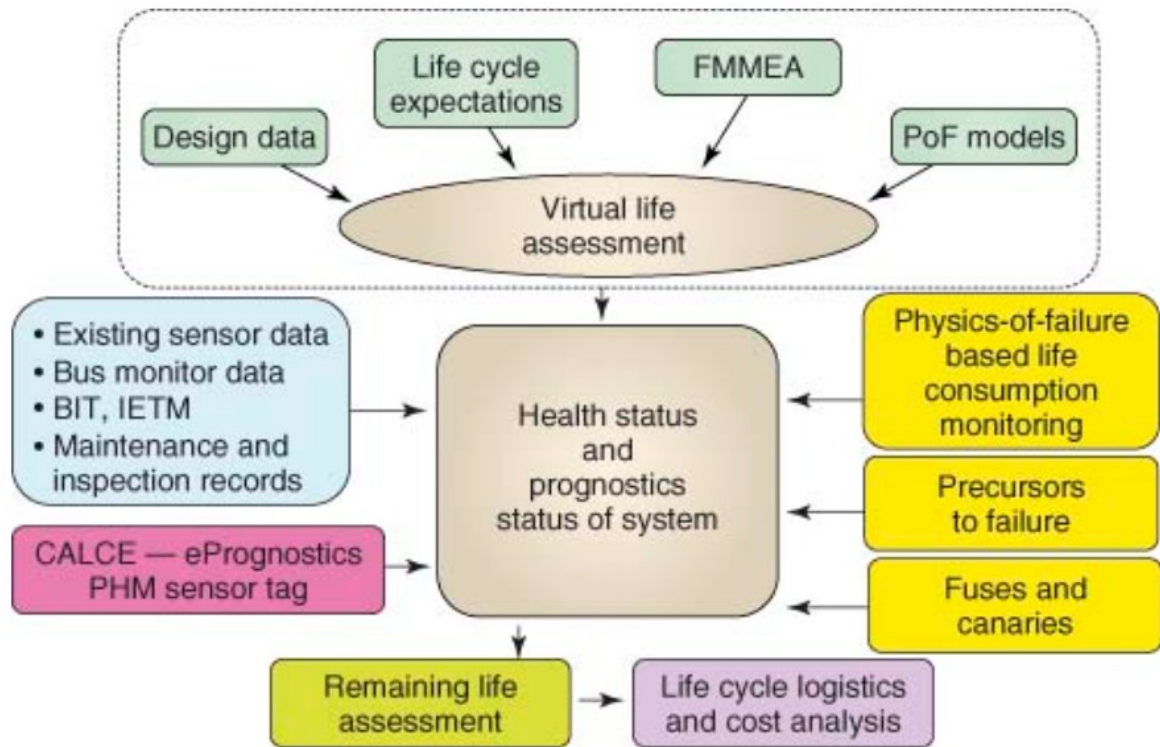


Figura 2.1: Metodologia CALCE per PHM [30]

Una tecnica altrettanto interessante che consente di effettuare una valutazione di affidabilità e della vita residua utile è quella che sfrutta il teorema di Bayes e l'analisi bayesiana dei dati [35], per l'implementazione di modelli cognitivi atti al condition monitoring. Dei modelli di prognosi adattiva basata sull'analisi bayesiana per il monitoraggio delle condizioni dei componenti elettronici di potenza sono riportati nei seguenti articoli scientifici [36] [37], dove in fig. 2.2 e fig. 2.3, si rappresentano i risultati delle stime effettuate, tramite l'analisi bayesiana, dai due lavori di ricerca. La ricerca di fig. 2.2 ha presentato un modello di monitoraggio della variazione della resistenza di on nel tempo come precursore e sull'impiego di un algoritmo bayesiano per l'elaborazione dei dati. È stata anche discussa l'analisi del meccanismo di guasto della fatica della saldatura con la modellazione basata sull'energia. L'esperimento è stato svolto analizzando ed elaborando in tempo reale dati di tensione e corrente di un convertitore GS66516B con una frequenza di campionamento di 100 kHz [37].

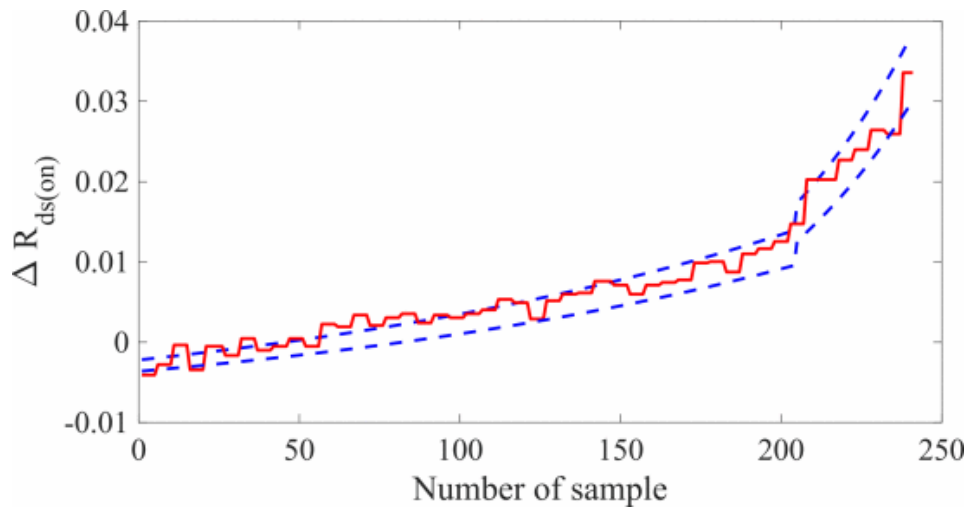


Figura 2.2: Risultato dell'analisi bayesiana per la previsione della resistenza di on; Intervallo blu: variazione della resistenza stimata; Linea rossa: variazioni reali della resistenza [37]

Nel lavoro di ricerca di fig. 2.3, invece, si è sviluppato uno stimatore di inferenza bayesiana, che introduce la probabilità a priori per migliorare l'accuratezza della stima dei modelli lineari. I modelli lineari basati sul metodo dei minimi quadrati, infatti, escludendo dall'analisi autonomamente i dati anomali causano errori di valutazione soprattutto durante le fasi iniziali dell'invecchiamento. Nell'esperimento si monitora la resistenza di on come precursore di guasto dei DUT durante il degradamento indotto da un'analisi ALT che sottopone i dispositivi a vari cicli di temperatura. ML è uno stimatore basato sulla stima di massima verosimiglianza per ricavare il parametro del modello β necessario per la RUL, mentre MAP è uno stimatore basato sul metodo massimo dei posteriori per determinare β [36].

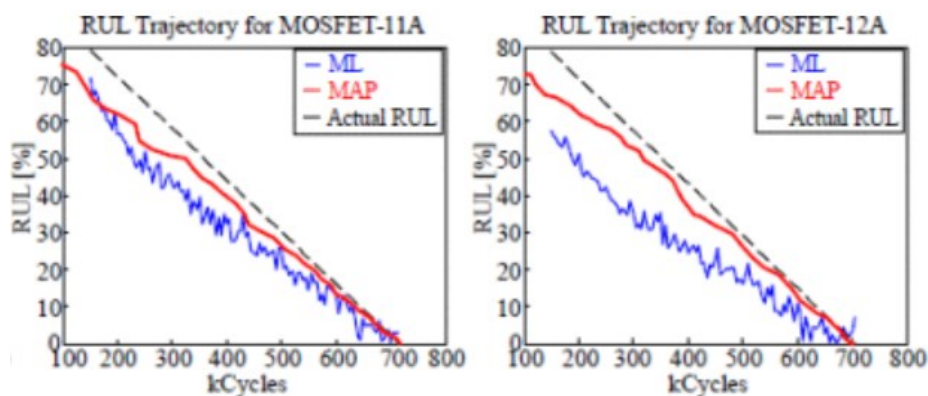


Figura 2.3: Confronto della vita utile residua stimata RUL in funzione dell'unità di ciclo (remaining useful life) con l'analisi bayesiana in due dispositivi. ML e MAP sono due modalità diverse per la determinazione dei parametri del modello analizzato [36]

2.3 Meccanismi di guasto nei dispositivi GaN

I meccanismi di degradamento dei dispositivi GaN si possono raggruppare in tre diverse categorie: degradazione del contatto, effetto di elettroni caldi, effetto piezoelettrico inverso e thermal cycling.

2.3.1 La degradazione del contatto

La degradazione del contatto è un meccanismo di guasto che non è molto rilevante negli HEMT GaN per temperature inferiori a 400°C, tuttavia, per utilizzi in corrente continua e temperature di giunzione T_j prossime ai 200°C sui dispositivi non ricotti con contatti Schottky in Ni o Au, a causa del consumo dello strato di AlGaN, si è osservato un innalzamento della barriera Schottky, il che anche se porta a migliorare l'efficacia del gate causa una riduzione della corrente di drain non desiderata. Si è scoperto però che una ricottura del gate permette una riduzione del 50% del degrado del contatto in questi dispositivi.

Su altri contatti ohmici in Ti, Al, Ni e oro, sottoposti a una sollecitazione prolungata in corrente continua prolungata per 2000 ore, si è riscontrato il peggioramento della rugosità superficiale che ha causato la formazione di crepe nella barriera e l'aumento della resistenza del contatto. Tale degradamento è avvenuto in quanto la conservazione a tale condizioni ha innescato sui dispositivi temperature fino a 290°C, che hanno innescato fenomeni diffusivi dell'Al negli strati metallici e del gallio nel semiconduttore, verso i composti metallici. È evidente quindi che la temperatura è un fattore in grado di deteriorare l'affidabilità e le prestazioni dei HEMT in GaN in maniera significativa, per tanto, essendo gli HEMT in GaN dei transistor che permettono e prevedono l'utilizzo a elevata potenza e frequenza, anche se si è visto che le modalità di fabbricazione influiscono molto sulla affidabilità dei contatti metallici, è necessario un monitoraggio della temperatura dei sistemi durante le fasi di esercizio al fine di prevedere un possibile degradamento dei contatti metallici.

2.3.2 Portatori caldi e generazione di trappole

Gli elettroni caldi sono portatori che accelerati dalla presenza di un elevato campo elettrico e quindi un'alta tensione, portano alla formazione di trappole all'interfaccia AlGaN/GaN o alla barriera del gate. La presenza di trappole (difetti nella struttura cristallina), in tali zone causa un aumento degli effetti di canale corto e di conseguenza una diminuzione della corrente I_{DS} . Un effetto introdotto dagli elettroni caldi negli HEMT AlGaN/GaN in presenza di alte tensioni e alte correnti è il current collapse [38].

Il current collapse (CC) provoca una riduzione della densità di portatori nel 2DEG e di conseguenza un aumento della resistenza di on e una diminuzione della corrente di drain. Il

CC è un fenomeno dovuto al fatto che in presenza di alte tensioni, gli elettroni hanno molta più probabilità di rimanere intrappolati all'interno all'interfaccia tra AlGaN/GaN o tra l'AlGaN e il dielettrico del gate, innescando così l'esaurimento del 2DEG [39]. La fig. 2.4 rappresenta la variazione della caratteristica di uscita di un HEMT dovuta al fenomeno del current collapse. Il grafico mostra come a causa del calo della R_{DSon} provocato dal CC la tensione al ginocchio V_{KNEE} aumenta mentre il picco della corrente di drain esprimibile dal dispositivo cala e anche la sua potenza. Per questo motivo la ricerca si è impegnata per trovare delle soluzioni che riducessero l'effetto del current collapse negli HEMT GaN, mediante l'applicazione di un field plate [40], di un virtual gate [41] e di una struttura di passivazione AlN/SiN_x [42].

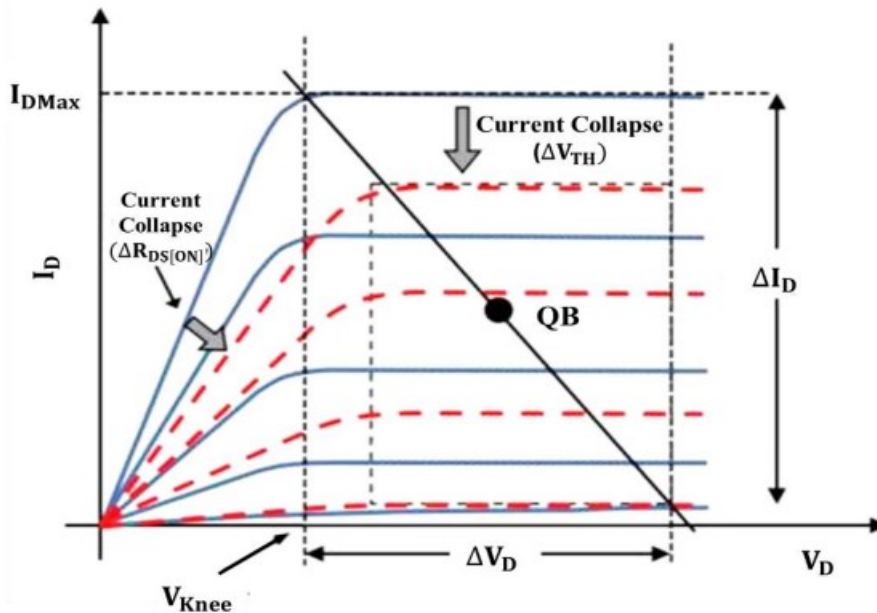


Figura 2.4: Effetto del current collapse sulla caratteristica di uscita $I_D - V_{DS}$; linea blu: prima del CC; linea rossa: caratteristica dopo il CC [43]

2.3.3 Effetto piezoelettrico inverso

Nelle sezioni precedenti si è visto che il nitruro di gallio è un materiale intrinsecamente piezoelettrico, ossia quel fenomeno caratteristico di certi materiali che se sottoposti a sollecitazioni o deformazioni esterne manifestano un'alterazione del loro campo elettrico. Nelle etero-strutture AlGaN/GaN a causa della loro asimmetria reticolare si introducono nel materiale degli stati di deformazioni che portano ad una alterazione di base del campo elettrico. Questo vuol dire, però, che anche la presenza nel materiale di un elevato campo elettrico, dovuto all'alimentazione con alte tensioni, causa un aumento dello stato di sollecitazione della struttura.

Se lo stress elettrico raggiunge determinati valori critici si introducono nel materiale dei difetti

cristallografici irreversibili che riducono l'elevata energia di deformazione elastica a cui è sottoposta la struttura, rilassandola, a discapito però di un degradamento immediato delle proprietà elettriche del dispositivo. È stato dimostrato che questo fenomeno di guasto, può comunque incombere in maniera lenta e graduale se si sottopone il dispositivo in modo continuativo, ciclico o costante a tensioni inferiori al valore della tensione di soglia. Tanto più bassa, in modulo, è la tensione rispetto al valore critico tanto più lento sarà il processo di degradazione.

2.2.4 Riassunto in tabella e rappresentazione grafica della degradazione di contatto, dei portatori caldi e della generazione di trappole e dell'effetto piezoelettrico nei dispositivi

In fig. 2.1 è rappresentata la tipica struttura di HEMT AlGaN/GaN in fase di degradazione a causa dei tre meccanismi di guasto elencati in questa sezione [38].

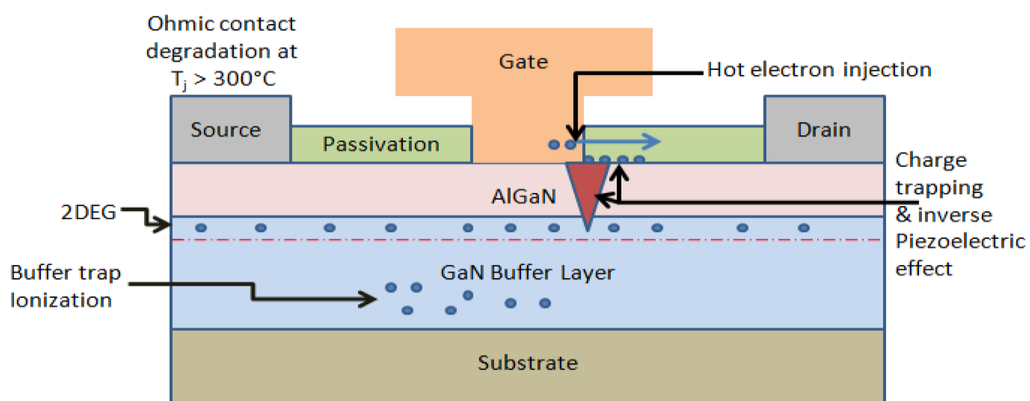


Figura 2.4: Rappresentazione dei meccanismi di guasto in un HEMT GaN [38]

La tabella 2.1 riassume i meccanismi di guasto descritti e le loro temperature a cui tipicamente incombono in maniera aggressiva sul dispositivo [33].

Meccanismo di guasto	Temperatura caratteristica del guasto	R_{DSon}	Tensione di soglia del gate	Corrente di gate
Contatto Schottky	>300°C	Cresce	Cresce	-
Generazione di trappole per portatori caldi	<200°C	-	Decresce	Cresce

Piezolettrico inverso	<200°C	Cresce	Decresce	Varia in modo anomalo
Degrado del contatto	>300°C	-	-	Cresce
Degradazione termica ohmica	>300°C	Cresce	Varia in modo anomalo	-
Intrappolamento della carica	<200°C	Cresce	Decresce	-

Tabella 2.1: Riassunto in tabella dei principali meccanismi di guasto nei power GaN [33]

2.3.5 Thermal cycling

Un altro aspetto critico dei HEMT al GaN nelle dinamiche di guasto, sebbene gli involucri protettivi siano migliorati notevolmente negli ultimi anni, è quello inerente alle sollecitazioni termomeccaniche subite dalle interconnessioni dei giunti di saldatura, in quanto, soprattutto nelle applicazioni ad alta potenza, sono ancora le zone che risentono maggiormente dei cicli termici introdotti dalla ripetizione continua delle fasi di accensione e spegnimento dei componenti. La continua alternanza della fase di on con la fase di off causa l'alternanza di fasi di riscaldamento e fasi di raffreddamento sul dispositivo. Avendo il giunto di saldatura una diversa dilatazione termica rispetto a quella dell'eterostruttura AlGaIn/GaN e a quella del circuito stampato, si innescano delle cricche di fatica da dilatazione termica nel componente. Per questo motivo negli HEMT il giunto di saldatura è ritenuto a livello termomeccanico "l'anello debole del componente" [37]. Questo ha spinto la ricerca a trovare per gli HEMT materiali di saldatura alternativi senza Piombo e a sviluppare tecniche di saldatura innovative come la tecnica di sinterizzazione nano-argento e la tecnica di incollaggio a diffusione TLP (diffusion bonding technique).

La tecnica di sinterizzazione nano-argento, proposta dai seguenti gruppi di ricerca [44] [45] [46], permette di effettuare il processo di sinterizzazione a temperature ridotte che vanno dai 220 ai 280°C. Inoltre, grazie alla sua struttura microporosa, il depositato in nano-argento riesce ad alleviare lo stress termomeccanico, infatti, ha mostrato un'ottima resistenza sia nei test di conservazione, dove ha resistito a 300°C per 400 ore, sia nei test di cicli termici, dove ha resistito a 1000 cicli in cui la temperatura oscillava dai -5°C ai 175°C. Il nano-argento sembra quindi essere un ottimo materiale per migliorare i guasti delle saldature negli HEMT. Tuttavia, l'elettromigrazione degli ioni di argento rappresenta ancora un limite della sua affidabilità.

La tecnica di legame per diffusione TLP, invece, combina la tradizionale saldatura in fase liquida mediante un processo di diffusione che permette di ottenere un giunto di saldatura con un punto di fusione più alto della temperatura di legame, infatti i moduli ricavati con la TLP anche se testati con oscillazioni di temperatura da -55°C a 200°C non hanno mostrato crepe o delaminazioni [47].

2.4 ALT e precursori di guasto nei HEMT in GaN

I test di invecchiamento accelerato ALT (accelerated life test) permettono di velocizzare il processo di invecchiamento dei sistemi elettronici, tramite, ad esempio, cicli di potenza che modulano la temperatura di giunzione, al fine di innescare i meccanismi di guasto, riuscire ad individuare i precursori del degradamento ed effettuare una stima della vita residua dei dispositivi.

Lo schema logico generale per effettuare un test di ciclo di potenza, rappresentato in fig. 2.5, prevede:

1. una definizione degli obiettivi, i quali possono essere: stima di vita, test dell'involucro ecc.;
2. un circuito di invecchiamento che consente di degradare il DUT (device under test) tramite la modulazione di parametri operativi come: la temperatura, la corrente, la tensione o la frequenza. effettuare, al fine di tarare in modo corretto lo stress esercitato sul DUT;
3. una misurazione della temperatura di giunzione diretta o indiretta tramite la rilevazione di altri parametri come la resistenza di on, la tensione di soglia e la resistenza termica;
4. un'analisi delle variazioni dei parametri di guasto come: la resistenza di on, la corrente di dispersione del gate e la riduzione della corrente di drain per determinare lo stato di guasto del DUT e interrompere il test.

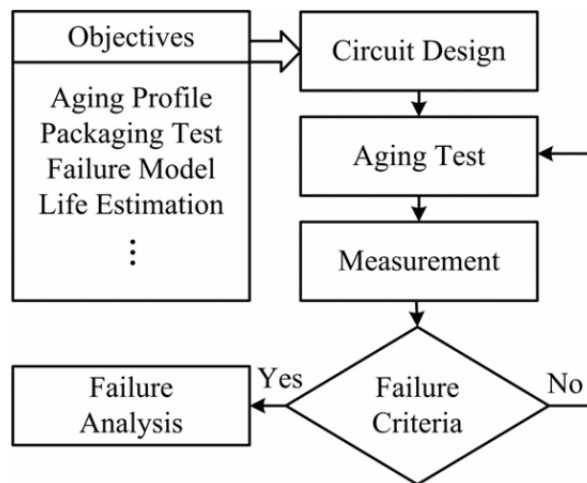


Figura 2.5: Diagramma di flusso del sistema di test power cycling [48]

I dispositivi elettronici sono stressati durante le fasi di esercizio principalmente dall'effetto termico. Per questa ragione le alte variazioni della temperatura di giunzione, introdotte dalle analisi ALT in power cycling, innescano un processo di degradamento molto veloce ed efficace degli HEMT.

Un esempio di setup per l'ALT progettato da C. Xu e altri [48] è rappresentato in fig. 2.6 e prevede oltre ai DUT una sorgente di corrente CS (current source), un controller DSP (digital signal processing), un dissipatore di calore a temperatura controllata e una scheda di misura. In tale configurazione l'oscillazione di temperatura è gestita dalla sorgente di corrente che controlla la corrente di alimentazione dei DUT. La CS, infatti, alterna delle fasi di on e di off dei dispositivi dove durante la fase di on, i DUT raggiungono le temperature tipiche di funzionamento reale SOA (safe operation area), mentre durante la fase di off, si permette con l'aiuto del dissipatore di calore il raffreddamento dei DUT. Durante la successione di queste fasi la T_j è ricavata indirettamente tramite la R_{ON} ottenuta dividendo la V_{DS} e la I_D rilevate tramite l'analizzatore Keysight B1506A.

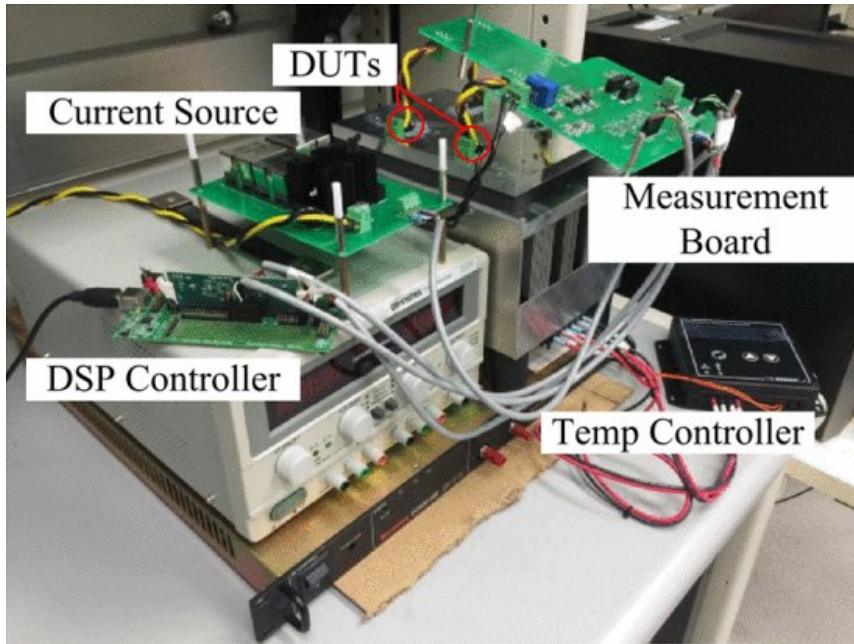


Figura 2.6: Esempio di Aging test setup hardware [48]

Questa configurazione è stata utilizzata per la ricerca dei precursori di guasto dei dispositivi GaN tramite il test di un 650 V cascode GaN e un 650 V p-gate GaN [48] [49]. Il lavoro effettuato dai ricercatori ha identificato come precursori di guasto la corrente di dispersione di gate-source I_{GSS} , la corrente di dispersione di drain-source I_{DSS} , la tensione di soglia V_{TH} e la resistenza di on $R_{DS,on}$. Inoltre, lo studio di S. Pu e altri [50] ha dimostrato che anche il tempo di on T_{ON} può essere considerato un valido precursore di guasto degli HEMT in GaN.

2.4.1 Effetto dell'invecchiamento sulla I_{GSS}

L'andamento della I_{GSS} in funzione del numero di cicli di potenza delle due configurazioni normalmente off testate è rappresentato in fig. 2.7.

Durante la misurazione della corrente di dispersione tra gate e source i DUT in cascode sono alimentati con una tensione tra gate e source di 15V, mentre quelli in gate p-GaN con una V_{GS} di 5 V.

Dai grafici di fig. 2.7 si nota che i dispositivi manifestano una ridotta corrente di leakage gate che rimane più o meno costante fino all'istante di guasto in cui cresce improvvisamente in maniera molto ripida e brusca di vari ordini di grandezza. L'andamento registrato non rende la I_{GSS} un precursore del guasto da monitorare per gli HEMT in quanto non mostra un cambiamento graduale con il degradamento ma cambia improvvisamente una volta avvenuto il guasto. Infatti, per monitorare lo stato di salute dei dispositivi e riuscire a programmare una manutenzione efficace è necessario sorvegliare i precursori che cambiano in maniera graduale e in linea con il processo di invecchiamento.

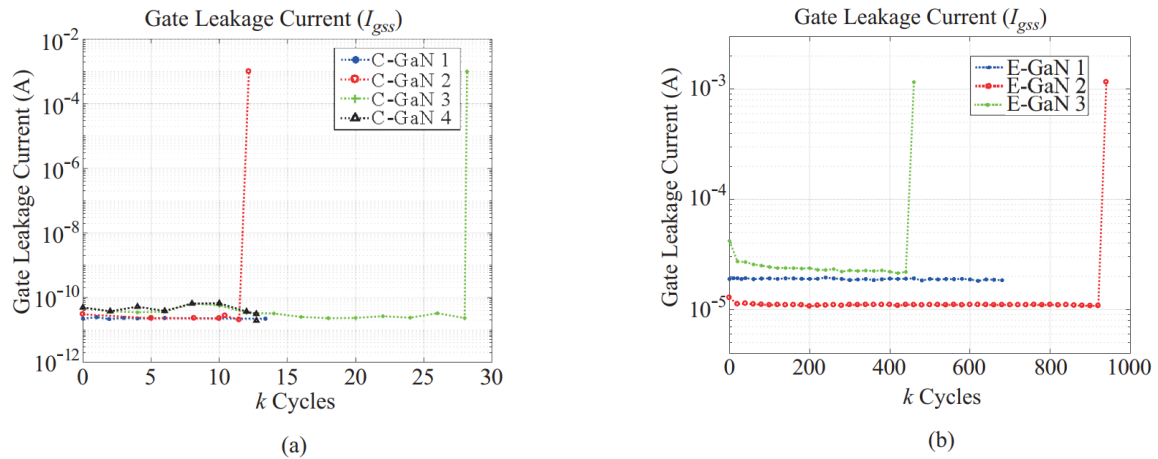


Figura 2.7: Andamento I_{GSS} durante l'analisi ALT dei dispositivi HEMT GaN in: a) cascode; b) gate p-GaN [49]

2.4.2 Effetto dell'invecchiamento sulla corrente di dispersione tra drain e source I_{DSS}

La I_{DSS} è la corrente di dispersione del drain ed è quella corrente misurata nel dispositivo quando la tensione tra gate e source è nulla. Analogamente alla I_{GSS} anche la I_{DSS} risulta essere poco sensibile al processo di invecchiamento se non a guasto avvenuto quindi non risulta essere un precursore ideale nei HEMT GaN.

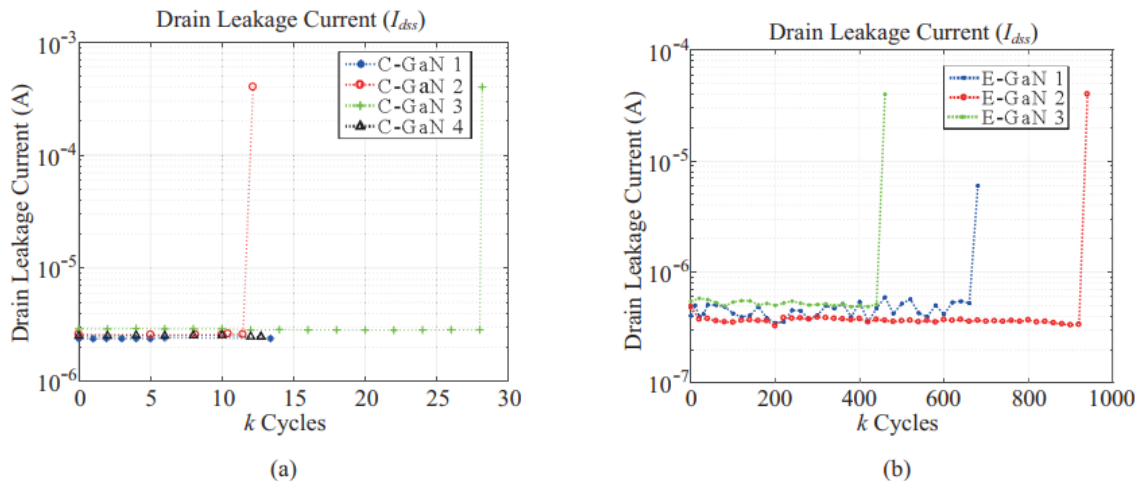


Figura 2.8: Andamento I_{DSS} durante l'analisi ALT di HEMT GaN: a) Cascode; b) Gate p-GaN [49]

2.4.3 Effetto dell'invecchiamento sulla tensione di soglia V_{TH}

La tensione di soglia è la tensione minima che deve esserci tra gate e source per porre in conduzione (stato di on) il dispositivo e ottenere una consistente corrente di drain. Come illustrato in fig. 2.9, durante il test, i dispositivi in configurazione cascode non hanno evidenziato una rilevante e graduale variazione di V_{TH} durante l'invecchiamento, mentre i dispositivi con gate p-GaN hanno evidenziato un aumento graduale della V_{TH} durante

l'invecchiamento. In quest'ultima configurazione la tensione di soglia in prossimità del guasto raggiunge il valore di picco, che risulta maggiore anche del 20% rispetto al valore iniziale, poi crolla bruscamente a seguito della rottura definitiva del DUT. Questo vuol dire che per gli HEMT con gate p-GaN, a differenza dei cascode, la tensione di soglia è un valido parametro da utilizzare per il rivelamento del degradamento.

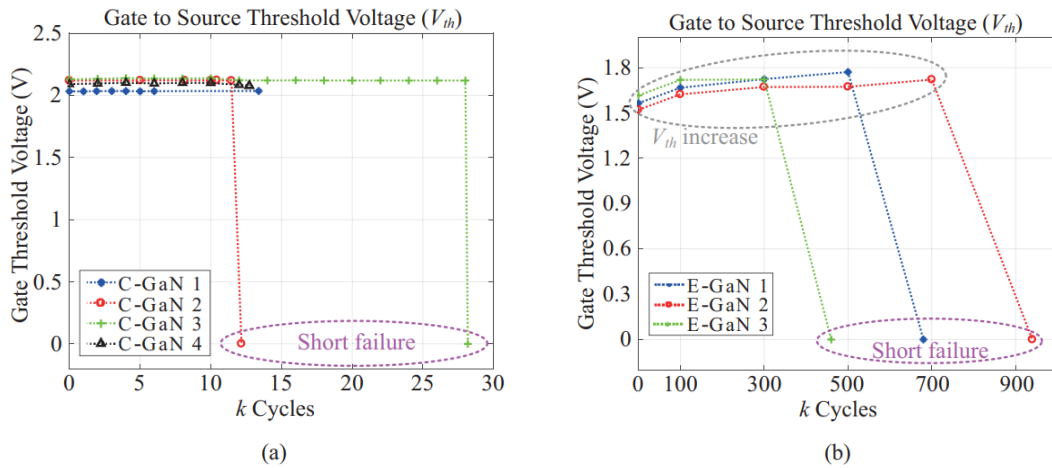


Figura 2.9: Andamento della V_{TH} durante l'analisi ALT di HEMT GaN: a) Cascode; b) Gate p-GaN [49]

2.4.4 Effetto dell'invecchiamento sulla resistenza di on R_{DSon}

Durante il test come mostrato in fig. 2.10, la resistenza di on aumenta in maniera graduale con l'aumento dello stato di degradamento dei DUT. Nello specifico, la R_{DSon} dei dispositivi ha manifestato un incremento fino all'8-10% del suo valore iniziale sia per gli HEMT in cascode sia per gli HEMT con gate p-GaN. L'aumento della R_{DSon} nei dispositivi cascode sembra essere causata principalmente dall'invecchiamento del packaging del dispositivo mentre nei dispositivi p-GaN sembra essere causato dal degrado della resistenza di canale.

La resistenza di on risulta quindi un ottimo candidato per il monitoraggio dello stato di salute degli HEMT GaN [49].

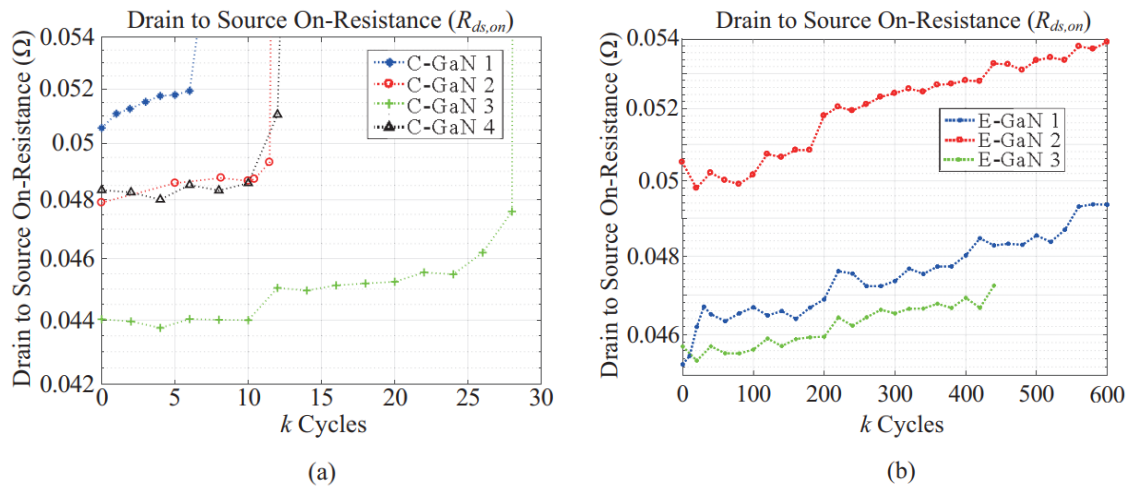


Figura 2.10: Andamento della R_{DSon} durante l'ALT di HEMT GaN: a) Cascade; b) Gate p-GaN [49]

2.4.5 Effetto dell'invecchiamento sul tempo di accensione T_{on}

Tramite un test di vita accelerata condotto da S. Pu e altri [50], è stato possibile dimostrare che il tempo di accensione dei dispositivi elettronici può essere considerato come un precursore affidabile del degradamento. Infatti, come evidenzia la fig. 2.11, T_{on} aumenta in maniera graduale con l'aumentare dello stato di degradamento del DUT. Il tempo di accensione peggiora con l'invecchiamento del dispositivo a causa del rallentamento della dinamica della I_d dovuto all'aumento della tensione di soglia, la quale porta alla riduzione della transconduttanza del dispositivo e quindi a una mobilità degli elettroni inferiore.

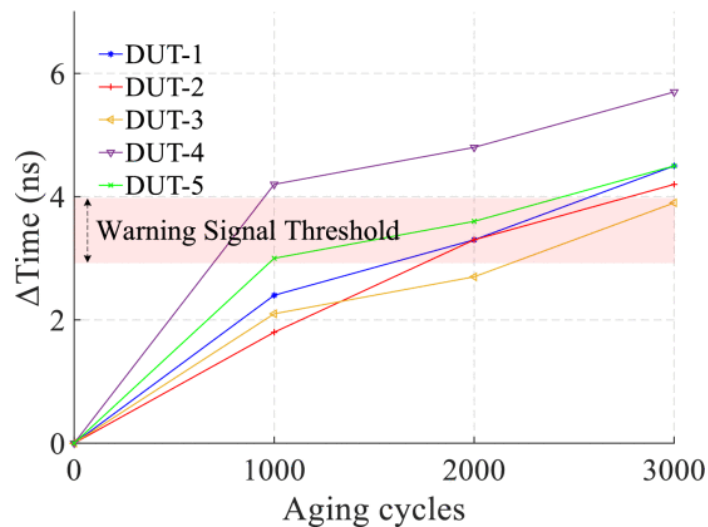


Figura 2.11: Misura del ritardo sul tempo di avvio ΔT_{ON} durante l'analisi ALT [50]

2.5 Alcune tecniche innovative di condition monitoring adattivo

Come si è discusso nel paragrafo 2.4, in seguito ai test di invecchiamento accelerato (ALT), in cui si sottopongono ciclicamente i dispositivi a determinate tensioni di alimentazione e temperature, si sono individuate nei dispositivi GaN delle variazioni dei parametri come: la I_{DSS} , la V_{th} , la R_{Dson} , e il T_{ON} . Tali parametri sono stati quindi riconosciuti come dei precursori delle varie tipologie di guasto negli apparecchi elettronici e hanno permesso di sviluppare modelli e tecniche che consentano un condition monitoring affidabile ed efficace per dispositivi come i convertitori di potenza al GaN [37].

Un sistema di CM, per essere funzionale, è necessario che effettui un monitoraggio attivo, quindi che fornisca una valutazione in tempo reale dello stato di affidabilità del dispositivo in esercizio e permetta di estrarre, dai dati acquisiti dal sistema, un modello che sia in grado di prevedere il funzionamento e, prima che sia troppo tardi, eventuali stati di danneggiamento del macchinario.

A livello base il monitoraggio delle condizioni può essere effettuato in maniera “offline” programmando, da manuale, la valutazione dello stato di salute del circuito elettronico. Tale approccio, seppur semplice, è caratterizzato da costi di manodopera elevati e dalla necessità di interrompere il funzionamento del componente ogni volta che si debba effettuare il controllo. È infatti evidente il vantaggio di un approccio in situ che consente il CM in tempo reale senza interrompere e ostacolare il funzionamento del sistema. Si sono quindi implementate tecniche di CM online in situ al fine di permettere maggior abilità nel riconoscere l’incipiente di guasto durante il funzionamento del dispositivo senza ostacolare le fasi di esercizio del sistema. Biglarbegia e altri hanno presentato un modello innovativo che permette di ridurre il numero di dispositivi per l’ALT grazie all’utilizzo di un’infrastruttura di rete di calcolo cloud che sfrutta l’analisi del deep learning per aggiornare attivamente il proprio modello di affidabilità [37].

Poiché i guasti dielettrici relativi all’imballaggio e il current collapse causano il 40% dei malfunzionamenti nei circuiti GaN, si sono sviluppate tecniche online di CM per il controllo del dispositivo e per il suo imballaggio, anche se si è evidenziato che effettuare in simultanea entrambe le tipologie di controllo rende il sistema di monitoraggio molto più complesso e facilmente deteriorabile.

Per effettuare un CM a livello di dispositivo si sfrutta spesso come precursore di degradamento la resistenza all’avvio R_{Dson} anche se offre una lettura dell’incipiente guasto poco accurata. È infatti complesso per il sistema capire se la variazione della R_{Dson} è dettata da una condizione di invecchiamento del componente o dalla variazione della temperatura.

Un precursore che sembra garantire maggiore efficacia della R_{DSon} è il tempo di avvio T_{on} anche se al momento non sono stati sviluppati molti sistemi che sfruttano il tempo di avvio per il CM dei dispositivi GaN. Nonostante a livello teorico T_{on} risulti un miglior precursore del guasto della R_{DSon} , l'elevata frequenza di commutazione a cui spesso i convertitori in nitruro di gallio sono sottoposti, potrebbe rendere il CM basato sul tempo di avvio poco affidabile a causa del ritardo nel rivelamento di T_{on} .

Lo sviluppo di nuove modalità di imballaggio dei dispositivi al GaN ha permesso di ridurre notevolmente la presenza di collegamenti e, di conseguenza, il loro rischio di guasto. Il trend è, infatti, quello di aspettare lo sviluppo di approcci per il CM dei packaging moderni che tengano conto della formazione di guasti dielettrici all'interfaccia termica, rilevata nei nuovi involucri.

Si presentano quindi alcune tecniche innovative per il condition monitoring dei dispositivi GaN per l'elettronica di potenza:

- il condition monitoring basato su R_{DSon} ;
- il monitoraggio delle condizioni basato su T_{on} per l'invecchiamento del dispositivo GaN indipendente da T_j ;
- Rilevamento del guasto dielettrico basato su I_{GSS} .

2.5.1 Condition monitoring basato su R_{DSon}

La resistenza di on è un parametro dei dispositivi elettronici di potenza che, se utilizzato come precursore, permette di ricavare uno schema affidabile per la valutazione dello stato di salute del circuito, in quanto, esclusa la sua suscettibilità alla temperatura, manifesta un andamento solidale con l'invecchiamento dell'HEMT. In tale tecnica di CM si sfrutta la dinamica della R_{DSon} come precursore del degradamento, che è causato dal current collapse caratteristico dell'alternanza continua della fase di on con la fase di off che si manifesta tipicamente durante le fasi di commutazione nei convertitori di potenza. Un convertitore in GaN quando è in un funzionamento statico con corrente continua, non essendo stressato da tensioni dinamiche e sollecitazioni con picchi di corrente non manifesta variazioni della sua R_{DSon} a causa del current collapse. Il funzionamento dinamico invece sottopone il dispositivo a una dinamica di tensione e al current collapse che innesca un aumento della R_{DSon} , in relazione diretta all'intensità dell'ampiezza di tensione con cui si alimenta il convertitore e dalla corrente del carico I_0 a cui è sottoposto. Un altro fattore che influenza il degradamento del dispositivo è la frequenza di commutazione f_{SW} . Più la f_{SW} è elevata più aumentano le sollecitazioni di

corrente in un arco nell'intervallo di tempo e più cresce la R_{DSon} , in quanto il sistema risulta sottoposto a collassi di corrente più frequenti e repentini. Tale processo di invecchiamento diventa molto rilevante nei convertitori in GaN in quanto sono tipicamente sottoposti a frequenze di switching molto elevate.

Per implementare un sistema di monitoraggio online delle condizioni che utilizzi R_{DSon} come precursore dell'invecchiamento del dispositivo interessato, si parte dalla misura simultanea di V_{DSon} e I_{DSon} allo switch M_H mentre è attivo. La fase di on di M_H consente di eccitare l'induttore L cortocircuitando V_{IN} al nodo V_{SW} .

Per effettuare una misura simultanea di V_{DSon} e I_{DSon} è necessaria la presenza di un temporizzatore che permette di sincronizzare i due sensori. Il sincronizzatore è in grado di abilitare un segnale Φ_1 in corrispondenza del fronte di salita di V_{SW} , in quanto V_{SW} , cresce in seguito all'attivazione di M_H , che porta alla rilevazione di V_{DSH} e I_{DSH} contemporaneamente. Il segnale dopo un dato intervallo di tempo si resetta ma comunica al sistema di mantenere in uno stato di hold i valori di V_{DSH} e I_{DSH} così da lasciare inalterati i valori rilevati di V_{DSon} e I_{DSon} che vengono elaborati con una funzione di divisione al fine di ottenere R_{DSon} .

La resistenza oltre ad essere influenzata dal degradamento del circuito è influenzata anche dalla temperatura di giunzione, per evitare quindi errori di valutazione dello stato di guasto si elabora la R_{DSon} ottenuta dal divisore cercando di togliere l'incremento introdotto dall'eventuale variazione di T_j , tramite un sistema che riconosce l'entità dell'effetto sulla resistenza di on causato dal valore della temperatura di giunzione. In fig. 2.12 sono illustrati lo schema a blocchi del metodo di CM proposto per un convertitore GaN e i grafici dell'andamento dei segnali nel tempo.

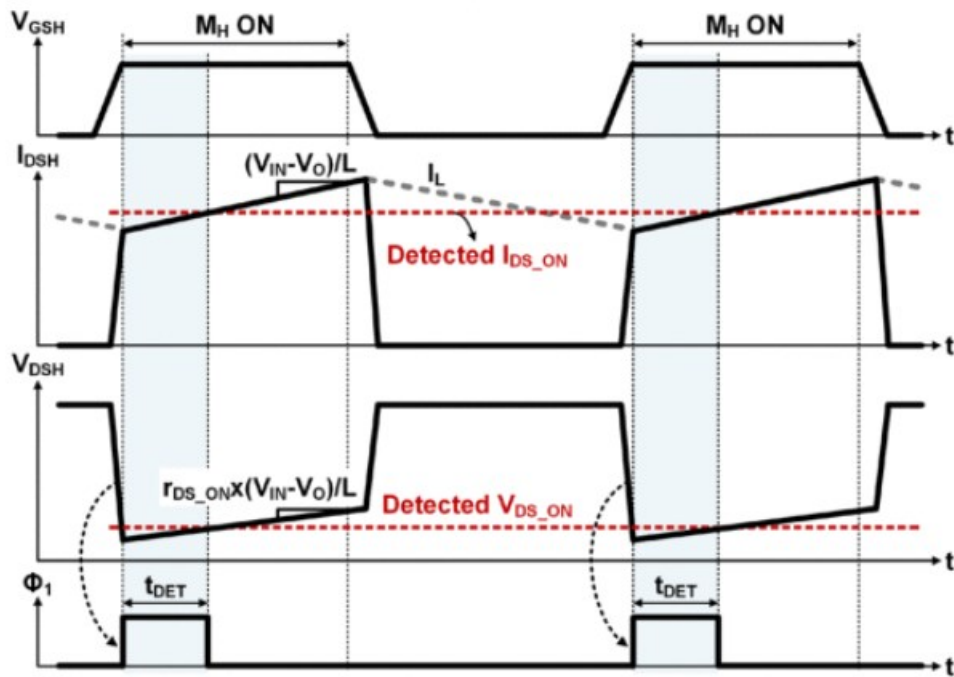
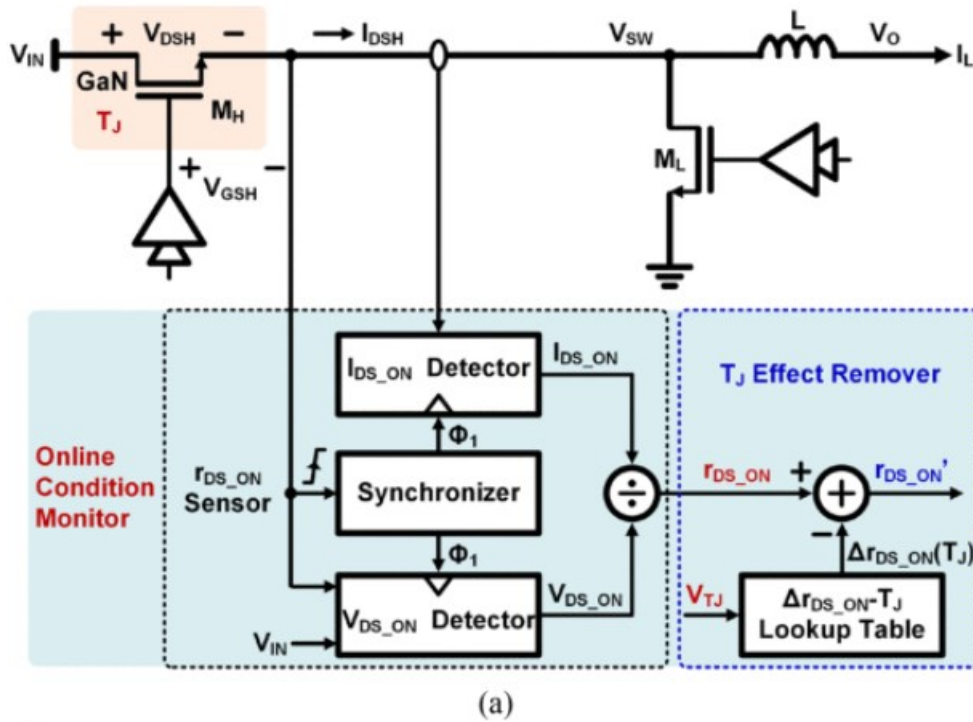


Figura 2.12: a) Schema a blocchi di un sistema di CM online basato R_{DSon} ; b) Diagrammi temporali [51]

2.5.2 Monitoraggio delle condizioni basato su T_{on}

Come discusso nel paragrafo 2.4.5, il tempo di avvio dei convertitori è un parametro molto sensibile e risulta un precursore del guasto molto efficace a livello teorico. Nella pratica però, durante le fasi di commutazione a elevata frequenza, tipica dei convertitori GaN, è stato difficile rilevare con precisione il tempo di avvio a causa del considerevole ritardo introdotto dalla dinamica dei convenzionali sistemi di monitoraggio. Al fine di ottenere quindi una

tecnica di CM basata sul T_{on} affidabile si è sviluppato un sistema ad anello chiuso basato sulla tensione tra drain e source V_{DS} [52]. In questo sistema un modulatore del ritardo allinea in modo adattivo l'intervallo di campionamento di V_{DS} con il T_{on} del dispositivo, consentendo un campionamento autoregolato di V_{DS} che permette di rendere poco rilevante l'errore sulla misurazione del tempo di avvio causato dal ritardo. In aggiunta grazie ad un rilevatore bifase viene esclusa la possibilità di una mancata corrispondenza del ritardo dovuta alla disposizione dei circuiti.

Va specificato però che anche T_{on} risente come la R_{DSon} dell'andamento della temperatura di giunzione T_J , per questo viene implementato nel sistema di CM una sezione, che sfrutta un sensore di temperatura, atta alla calibrazione dell'errore di lettura del tempo di avvio introdotto a causa della variazione della temperatura. In fig. 2.13 è rappresentato lo schema a blocchi di tale tecnica di CM.

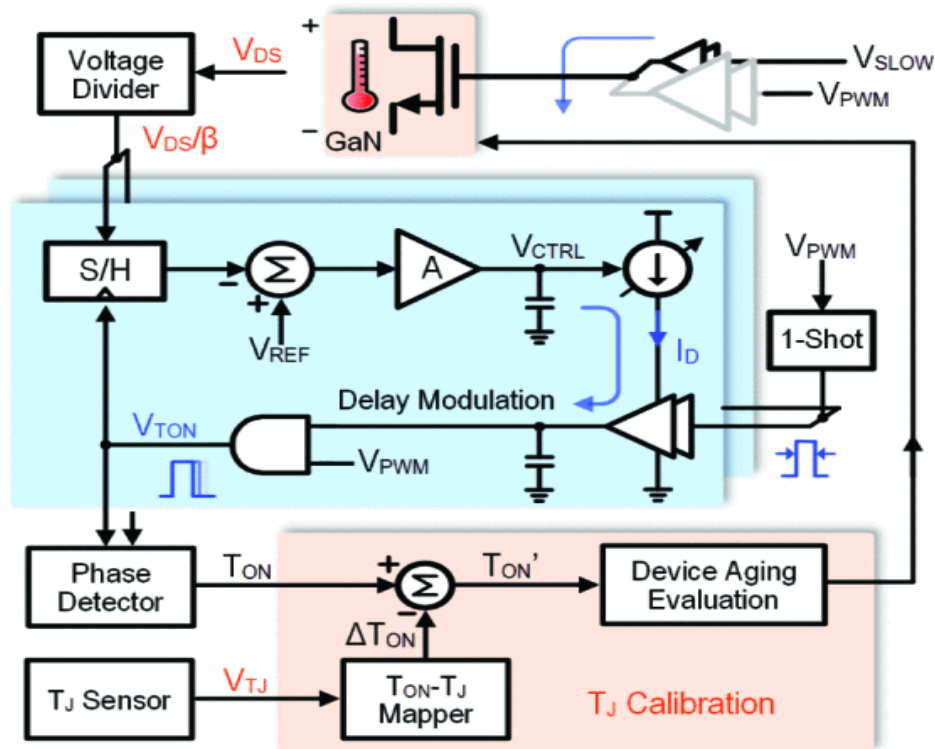


Figura 2.13: Schema a blocchi di un sistema di condition monitoring basato sul rivelamento di T_{on} ad anello chiuso su V_{DS} con calibrazione di T_J [52]

Un aspetto critico legato a tale modalità di monitoraggio è il fatto che la resistenza di on dell'HEMT varia anche quando il sistema non è in una fase di ricezione attiva e ciò potrebbe rendere il CM meno preciso se non fosse che la dinamica di decadimento agli stati di on della R_{DSon} è nettamente più lenta della frequenza di funzionamento del sistema proposto. Questo

vuol dire che nelle fasi di non misurazione la R_{DSon} varia in modo trascurabile e che quindi la perdita di informazione è tollerata e quindi non mette in discussione l'affidabilità della tecnica di monitoraggio [51].

2.5.3 Rilevamento del guasto dielettrico basato su I_{GSS}

La corrente di dispersione del gate I_{GSS} è un parametro che può essere utilizzato come precursore per rilevare il guasto dielettrico nei dispositivi GaN, in quanto alla frattura del dielettrico corrisponde sempre un aumento rilevante di I_{GSS} . La corrente di dispersione non varia per la maggior parte della vita di un dispositivo elettronico ma è influenzata dalla temperatura di giunzione. La misura della I_{GSS} permette, infatti, di ricavare indirettamente la T_j indipendentemente dall'invecchiamento. Il sistema di controllo riesce a riconoscere se l'aumento di I_{GSS} è dato da un guasto nel dielettrico o dall'incremento della temperatura di giunzione perché, a seconda della modalità, la corrente varia, nel tempo, con un andamento diverso. Infatti, il guasto fa crescere I_{GSS} con un andamento esponenziale in funzione del tempo, mentre l'aumento di temperatura fa crescere la corrente con un andamento molto meno rapido. Per questo motivo il monitoraggio del guasto dielettrico e la misurazione della T_j possono essere eseguiti contemporaneamente.

Il CM per i guasti al dielettrico sfrutta lo schema a blocchi in fig. 2.14, il suo principio di funzionamento è basato sulla relazione lineare che lega la I_{GSS} con la capacità del gate, la tensione tra gate e source V_{GSS} e il tempo di scarica, con la seguente relazione:

$$I_{GSS} = C_G \frac{\Delta V_{GS}}{t_s}$$

In questo modo scaricando leggermente il condensatore e misurando il tempo di scarica e la variazione della V_{GS} è possibile quindi ricavare indirettamente la corrente di dispersione del gate [52].

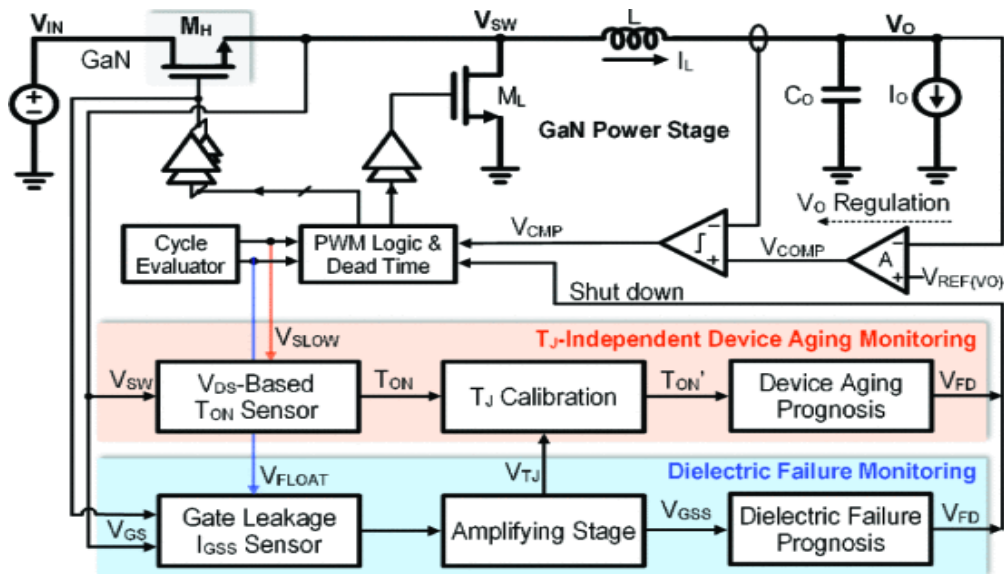


Figura 2.14: Schema a blocchi di un sistema di monitoraggio basato su I_{GSS} con sensore per T_j [52]

2.5.4 Monitoraggio simultaneo di R_{DSon} e V_{TH} durante la fase di commutazione

Un modello sviluppato da Alessandro Chini e altri [53] che ha reso possibile rilevare la riduzione delle prestazioni e dell'andamento dei meccanismi di guasto dei HEMT, durante il funzionamento ad alta frequenza, quindi in condizioni tipiche di esercizio, è stato il sistema di Monitoraggio simultaneo di R_{DSon} e V_{TH} durante la fase di commutazione. Tale approccio sfrutta un generatore di segnali (SYNC) che manda in ingresso a un microcontrollore (MCU) un segnale in onda quadra. Il MCU grazie all'input ricevuto fornisce i segnali di commutazione che:

- fanno variare periodicamente la tensione tra il valore di alta tensione e bassa tensione il generatore di impulsi del drain;
- mettono in funzione il generatore di forme d'onda che genera una rampa di tensione di parte da un valore basso di tensione $V_{GL} < V_{TH}$, in cui il dispositivo è in fase di off e arriva ad un valore alto di tensione $V_{GH} > V_{TH}$ in cui invece è in fase di on;
- gestisce l'attivazione di un circuito di bloccaggio che migliora la precisione della misurazione anche a bassi valori di drain;
- attiva un oscilloscopio di campionamento digitale che traccia e misura l'andamento nel dispositivo di V_D, V_G, V_{D1}, V_{D2} e grazie al tracciamento della caduta di tensione su un resistore di rilevamento anche di I_D .

Il microcontrollore permette, oltre a controllare il set-up, di monitorare i precursori R_{DSon} e V_{TH} per un lungo periodo di tempo senza portare in saturazione il Distribution operation

System (DSO), in quanto il DSO grazie a questa configurazione non viene attivato ad ogni switch ma a seconda di un andamento simil-logaritmico che gli permette di rilevare la variazione della resistenza di on e della tensione di soglia attivandosi meno frequentemente. Questa modalità di misurazione consente di rilevare il degradamento del dispositivo causato da fenomeni fisici sia che abbiano dinamiche transitorie veloci che lente, in fig. 2.15 è rappresentato uno schema a blocchi di tale tecnica di monitoraggio.

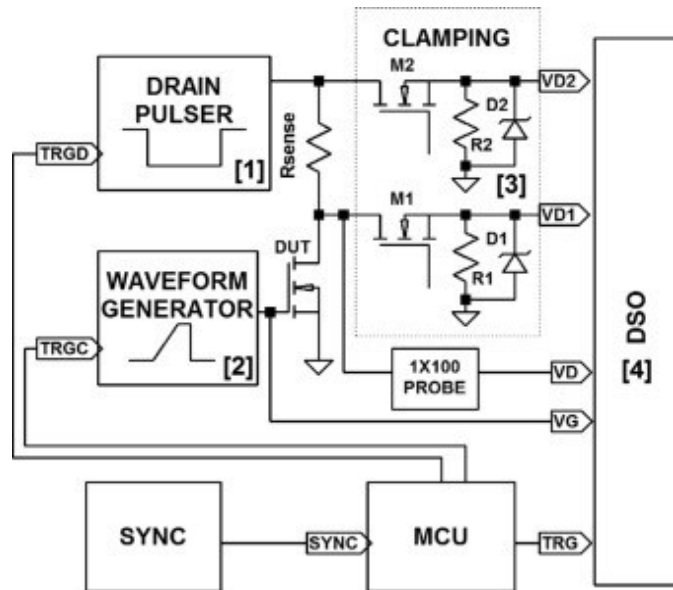


Figura 2.15: Schema a blocchi semplificato di un sistema di misura per il monitoraggio di R_{DSon} e V_{TH} di un dispositivo durante la fase di commutazione [53]

Con questo approccio A. Chini e altri sono riusciti a sviluppare un sistema che monitorasse contemporaneamente le variazioni di due precursori come R_{DSon} e V_{TH} di un HMET in GaN durante la fase di commutazione, simulando delle condizioni di lavoro reali e che fosse in grado di captare le variazioni dei parametri e sorvegliare da subito i processi di invecchiamento. Tale modalità ha permesso quindi la conferma e un ulteriore chiarimento di alcune dinamiche inerenti alle modalità di degradamento della R_{DSon} e della V_{TH} dei HEMT in GaN [53].

La ricerca scientifica ha proposto molte soluzioni per il condition monitoring e la rilevazione dei precursori con prognostica adattiva, alcuni basati sulla resistenza di on come quello proposto da M. Biglarbegian e altri [37] e alcuni invece sulla Temperatura di giunzione come quello sviluppato da M. Galvanovics e altri che consente, tramite una rete di resistenza e un sensore non collegato direttamente al dei dispositivo GaN, di stimare la T_j durante i test di affidabilità [54]. Quindi anche se negli ultimi anni sino stati fatti notevoli passi in avanti

portando anche allo sviluppo di tecniche che permettono di effettuare il monitoraggio delle condizioni in simultanea ai test di affidabilità, è importante ai fini di ottenere convertitori al GaN sempre più utilizzabili dall'industria dell'elettronica di potenza, che la ricerca approfondisca il legame tra i meccanismi di guasto e le corrispondenti variazioni nei precursori, inerenti al fenomeno di degrado manifestato [55], e che si continui lo sviluppo di modelli sempre più precisi ed efficaci di condition monitoring atti alla supervisione dello stato di salute dei dispositivi in nitruro di gallio.

CONCLUSIONI

Nella suddetta tesi si è riportato lo stato dell'arte e alcune tecniche per il condition monitoring dei dispositivi in GaN utilizzati nelle applicazioni dell'elettronica di potenza. Il lavoro di ricerca bibliografica è suddiviso in due parti, una per lo stato dell'arte sulla tecnologia GaN e una per le tecniche di CM.

Nel primo capitolo si mettono a confronto le proprietà intrinseche del silicio con quelle del nitruro di gallio. Il GaN risulta essere un semiconduttore con delle caratteristiche nettamente superiori rispetto a quelle del silicio. Per questo motivo la ricerca ritiene che i dispositivi al nitruro di gallio possano cambiare radicalmente il mondo dell'elettronica di potenza, portando allo sviluppo di transistor ad alta mobilità elettronica che rendano i convertitori di potenza: più performanti, più efficienti e più compatti, aprendo così le porte a nuova era di progresso tecnologico grazie a macchinari elettronici ad alta potenza e elevata frequenza di commutazione.

Successivamente si sono descritte alcune soluzioni per la costruzione di dispositivi GaN normalmente off, evidenziando pro e contro delle varie configurazioni. Al momento la porta p-GaN rimane l'unica configurazione effettivamente implementabile che permette la costruzione di HEMT veramente normalmente off. È quindi evidente la necessità da parte della comunità scientifica di cercare di migliorare le soluzioni proposte, con l'obiettivo di sviluppare veri dispositivi GaN normalmente spenti sempre più affidabili, performanti e sfruttabili dall'industria di massa.

Nel secondo capitolo si è trattata la parte inerente alla valutazione dell'affidabilità e al monitoraggio delle condizioni dei dispositivi GaN. Si sono descritti infatti alcuni approcci che permettono di quantificare l'affidabilità, evidenziando la tendenza dei metodi moderni a considerare oltre alle funzioni statistiche anche la fisica del guasto e il profilo di missione del sistema. Il PHM è risultato essere un approccio molto interessante per lo studio dell'affidabilità dei dispositivi GaN, in quanto, oltre a tenere conto delle condizioni di esercizio del sistema, è in grado di sviluppare modelli che siano auto-adattivi e che possano sfruttare il deep-learning. Sono stati poi descritti i fenomeni di degradamento, riportando come i meccanismi di guasto modificano certi parametri come la R_{DSon} e la T_j dei HEMT GaN, i quali sono risultati alcuni dei premonitori dell'invecchiamento dei dispositivi.

In fine si sono descritte e riportate alcune tecniche di CM che monitorano alcune grandezze, grazie all'implementazione di determinati modelli, consentendo di poter strutturare e programmare gli interventi di manutenzione dei convertitori di potenza così da rendere i dispositivi GaN più sicuri e meno soggetti a cali di performance.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Roccaforte Fabrizio; Giuseppe Greco; Patrick Fiorenza; Ferdinando Iucolano, «An overview of normally-off GaN-based high electron mobility transistors,» *Materiali* 12, n. 10: 1599., p. <https://doi.org/10.3390/ma12101599>, 2019.
- [2] Lozej e N. N. Gow, «Bauxite,» *Geoscience Canada*, 1993.
- [3] «ise institut fur seltene erden und metalle ag,» [Online]. Available: [https://it.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle-2/gallium/#:~:text=Estrazione%20e%20presentazione,sciolti%20in%20idrossido%20di%20sodio..](https://it.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-metalle-2/gallium/#:~:text=Estrazione%20e%20presentazione,sciolti%20in%20idrossido%20di%20sodio..) [Consultato il giorno ottobre 2022].
- [4] «Elaborazione Infineon Technologies su dati Yole Développement,» [Online]. Available: <https://www.i-micronews.com/products/power-gan-2022/>. [Consultato il giorno novembre 2022].
- [5] J. He, Cheng, Wang, C. Q., Yu e H Chai, «Recent Advances in GaN-Based Power HEMT Devices.,» in *Adv. Electron. Mater.*, <https://doi.org/10.1002/aelm.202001045>, 2021.
- [6] X. H. Luan, C. Feng, H. B. Qin, F. F. Niu e D. G. Yang, «The electronic properties of zinc-blende GaN, wurtzite GaN and pnma-GaN crystals under pressure,» in *18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 2017.
- [7] F. Roccaforte, P. Fiorenza, R. Lo Nigro, F. Giannazzo e G. Greco, «Physics and technology of gallium nitride materials for power electronics,» 2018.
- [8] X. H. Luan, C. Feng, H. B. Qin, F. F. Niu e D. G. Yang, «The electronic properties of zinc-blende GaN, wurtzite GaN and pnma-GaN crystals under pressure,» in *18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 2017.
- [9] J. Baliga, «Power semiconductor device figure of merit for high-frequency applications,» in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 10, n. 10, pp. 455-457, 1989.
- [10] a. G. Simoes, «Power Bipolar Transistors,» in *Power, Electronics Handbook (Third Edition)*, Butterworth-Heinemann, Muhammad H. Rashid ISBN 9780123820365, 2011, pp. 29-41,.
- [11] «elettronica in elettronica applicata,» [Online]. Available: <https://ei.futuranet.it/2021/03/16/come-verificare-lintegrita-di-un-mosfet/>, .:
- [12] Batarseh e Issa, «The Power MOSFET,» in *Power Electronics Handbook (Third Edition)*, Muhammad H. Rashid ISBN 9780123820365,, 2011, pp. 43-71.
- [13] H. X. Guang, Z. D. Gang e J. D. Sheng, «Formation of two-dimensional electron gas at AlGaIn/GaN heterostructure and the derivation of its sheet density expression,» *Chinese Physics B*, p. 24(6): 067301, 2015.

- [14 J. Lui, Cheng, W. C. Wang, Qz, Cheng, K. Yu e H. Chai, «Recent Advances in GaN-Based Power HEMT Devices,» in *Adv. Electron*, 2021, p. 7.
- [15 F. Roccaforte, G. Greco, P. Fiorenza e F. Iucolano, «An Overview of Normally-Off GaN-Based High Electron Mobility Transistors.,» *Materials*, n. <https://doi.org/10.3390/ma12101599>, 2019.
- [16 Y. Uemoto e al, «Gate Injection Transistor (GIT)—A Normally-Off AlGaIn/GaN Power Transistor Using Conductivity Modulation,» *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 54, n. 12, pp. 3393-3399, 12 2007.
- [17 I. Hwang, «P-GaN Gate HEMTs With Tungsten Gate Metal for High Threshold Voltage and Low Gate Current,» *IEEE Electron Device Letters*, vol. 34, n. 2, pp. 202-204, 2013.
- [18 Y. Huang, L. Zhang, Z. Cheng, Y. Zhang, Y. Ai, Y. Zhao, H. Lu, J. Wang e J. Li, «AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with selective area grown p-GaN gates,» *Semiconductor*, vol. 37, 2016.
- [19 R. Hao, K. Fu, G. Yu, W. Li, J. Yuan, L. Song, Z. Zhang, S. Sun, X. Li, Y. Cai, X. Zhang e B. Zhang, «Normally-off p-GaN/AlGaIn/GaN high electron mobility transistors using hydrogen plasma treatment».
- [20 H. Jiang, «13300 V normally-OFF p-GaN Gate HEMTs on Si With High ON-State Drain Current,» *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 68, n. 2, pp. 653-657, 2021.
- [21 M. Meneghini, O. M. Hilt, O. Hilt, J. Wuerfl e G. Meneghesso, «Technology and Reliability of Normally-Off GaN HEMTs with p-Type Gate,» in <https://doi.org/10.3390/en10020153>, *Energies* 2017.
- [22 Z. Li e T. Chow, «Channel scaling di MOS-HEMT ibridi al GaN,» *Solid State Electron*, vol. 56, pp. 111-115, 2011.
- [23 N. Ikeda, R. Tamura, T. Kokawa, H. Kambayashi, Y. Sato, T. Nomura e Kato, «MOS-HFET ibridi GaN normalmente off a oltre 1,7 kV con una minore resistenza di accensione su substrato Si,» in *Proceedings of the 23rd International Symposium on Power Semiconductors*.
- [24 P. Fiorenza, G. Greco, F. Iucolano, A. Patti e F. Roccaforte, «Mobilità di canale in GaN Hybrid MOS-HEMT utilizzando SiO₂ come isolante di gate,» *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 64, pp. 2893-2899, 2017.
- [25 G. Santoruvo, «Nanofili AlGaIn/GaN: dal trasporto di elettroni alle applicazioni RF,» EPFL, 2020.
- [26 W. C. Cheng, «Silicon Nitride Stress Liner Impacts on the Electrical Features of AlGaIn/GaN HEMTs,» *IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, vol. 10, pp. 1-3, 2019.

- [27 G. Greco, F. Iucolano e F. Roccaforte, «A Review of technology for normally-off HEMTs with p-GaN gate,» vol. 78, 2018, pp. 96-106.
- [28 J. Zhang, L. He, L. Li, Y. Ni, T. Que, Z. Liu, W. Wang, J. Zheng, Y. Huang, J. Chen, X. Gu, Y. Zhao, L. Lui, Z. Wu e Y. Liu, «IEEE 30th Int. simp. su Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD),» NJ pp. 224 – 22, Piscataway, 2018.
- [29 S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran e P. Tavner, «Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, n. 11, pp. 2734-2852, 2010.
- [30 M. Pecht, «Prognostics and Health Management of Electronics,» in *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, C. Boller, F.-K. Chang and Y. Fujino, 2009.
- [31 K. Ma, H. Wang e F. Blaabjerg, «New Approaches to Reliability Assessment: Using physics-of-failure for prediction and design in power electronics systems,» *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 3, n. 4, pp. 28-41, 2016.
- [32 M. Musallam, C. Yin, C. Bailey e C. M. Johnson, «Application of coupled electro-thermal and physics-of-failure-based analysis to the design of accelerated life tests for power modules,» *Microelectronics Reliability*, vol. 54, 2014.
- [33 M. Biglarbegian, «On condition monitoring of high frequency power GaN converters with adaptive prognostics,» *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1272-1279, 2018.
- [34 H. Boulzazen, C. Douzi e E. Joubert, «PHM method for detecting degradation of GaN HEMT ON resistance, application to power converter,» *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 2, 2022.
- [35 J. Kruschke, «Bayesian data analysis,» WIREs Cogni Sci, 2010.
- [36 M. Heydarzadeh, S. Dusmez, M. Nourani e B. Akin, «Bayesian remaining useful lifetime prediction of thermally aged power MOSFETs,» in *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 2718-2722, doi : 10.1109/AP, 2017.
- [37 M. Biglarbegian e al, «On condition monitoring of high frequency power GaN converters with adaptive prognostics,» in *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2018.
- [38 Cheney, E. A. D. David J., L. Liu, C. F. Lo, B. P. Gila e F. R. e. S. J. Pearton., «Degradation Mechanisms for GaN and GaAs High Speed Transistors,» *Materials* 5, n. https://doi.org/10.3390/ma5122498, pp. 2498-2520, 2012.
- [39 T. Sugiyama e al, «Evaluation methodology for current collapse phenomenon of GaN HEMTs,» in *2018 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, Burlingame, 2018.

- [40] I. Hwang e al, «Impact of Channel Hot Electrons on Current Collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs,» *IEEE Electron Device Letters*, vol. 34, n. 12, pp. 1494-1496, 2013.
- [41] D. Patanvariya, S. Kumar e L. Giri, «Influence of Current Collapse in AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistors,» *International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pp. 1-5, 2019.
- [42] Z. Tang, S. Huang, Q. Jiang e al, «High-Voltage (600V) Low-Leakage Low-Current-Collapse AlGa_N/Ga_N HRMTs with ALN/SiN_x Passivation,» *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 34, n. 3, p. 34, 2013.
- [43] H. Hasegawa, T. Inagaki, S. Ootomo e Hashizume, «Mechanisms of current collapse and gate leakage currents in AlGa_N/Ga_N,» in *Technol. B Microelectron. Nanometer Struct. Process. Meas. Phenom*, 2003.
- [44] J. Bai, Z. Zhang, J. Calata e Lu, « Low-temperature sintered nanoscale silver as a novel semiconductor devicemetallized substrate interconnect material,» *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 2006, vol. 29, n. 589-593, 2006.
- [45] L. Navarro, X. Perpiñà, M. Vellvehi e Jorda, «Silver nano.particles sintering process for the die-attach of power devices for high temperature applications,» *Ing. Mec. Technol. Desarrollo*, vol. 4, pp. 97-102, 2012.
- [46] M. Knoerr e S. A., «Power semiconductor joining through sintering of silver nanoparticles: Evaluation of influence of parameters time, temperature and pressure on density, strength and reliability,» *Proceedings of the 2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, pp. 1-6, 2010.
- [47] Wang, Yalin, Y. Ding e Y. Yin., «Reliability of Wide Band Gap Power Electronic Semiconductor and Packaging: A Review,» *Energies*, vol. 15, n. 18, 2022.
- [48] C. Xu, E. Ugor e B. Akin, «Investigation of performance degradation in thermally aged cascode Ga_N power devices,» in *2017 IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, 2017.
- [49] C. Xu, E. F. Yang, Ugur, S. Pu e B. Akin, «Performance degradation of Ga_N HEMTs under accelerated power cycling tests,» *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 3, n. 4, pp. 269-277, 2018.
- [50] S. Pu, E. Ugur, F. Yang e B. Akin, «In situ Degradation Monitoring of SiC MOSFET Based on Switching Transient Measurement,» in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, n. 6, pp. 5092-5100, 2020.
- [51] Ma, Y. Chen e DB, «Self-Aging-Prognostic Ga_N-Based Switching Power Converter Using TJ-Independent Online Condition Monitoring and Proactive Temperature Frequency Scaling,» in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, pp. 5022-5031, 2021.
- [52] L. Du, Y. Huang e D. B. Ma, «On-Chip Condition Monitoring of Ga_N Power Devices Using TJ-Independent TON Precursor for Device Aging and Gate Leakage IGSS for

Dielectric Failure,» *2022 IEEE 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, pp. 209-212, 2022.

- [53 C. Alessandro e F. Iucolano, «Evolution of on-resistance (RON) and threshold voltage (VTH) in GaN HEMTs during switch-mode operation,» *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 78, pp. 127-131, 2018.
- [54 M. Ofner, M. Glavanovics e A. Mütze, «Indirect In-Situ Junction Temperature Measurement for Condition Monitoring of GaN HEMT Devices during Application Related Reliability Testing,» in *2021 27th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, pp. 1-5, doi: 10.1109/THERMINIC52472.2021.9626523., 2021.
- [55 R. Trew, D. Green e J. Shealy, «AlGaIn/GaN HFET reliability,» in *IEEE Microwave Magazine*, pp. 116-127, 4 10 2009.