

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA
(LAUREA MAGISTRALE DM 270/04)

**STUDIO DELLE CORRENTI DI PERDITA
VERTICALI E DEL BREAKDOWN
IN ETEROSTRUTTURE ALGAN/GAN
UTILIZZATE PER DISPOSITIVI DI POTENZA**

Relatore

PROF. MATTEO MENEGHINI

Correlatore

PROF. GAUDENZIO MENEGHESSO

Laureando

DAVIDE BENAZZI

A.A. 2019/2020

Sommario

In questo elaborato vengono studiati i processi di conduzione che caratterizzano le perdite verticali e i meccanismi di breakdown in eterostrutture AlGa_N/Ga_N, cresciute su un substrato di silicio di tipo p, per mezzo di misure corrente-tensione al variare della temperatura. Lo studio viene effettuato partendo da sotto-strutture cresciute epitassialmente, fino a giungere all'eterostruttura completa di tutti i suoi strati. In tutte le sotto-strutture si osserva una dipendenza della corrente dalla temperatura, tranne nel caso dell'AlN (per il quale il processo di conduzione dominante sembra essere il tunneling), e un aumento della tensione di BD all'aumentare dello spessore della struttura. L'incremento più evidente della BDV si ottiene aggiungendo lo strato di Ga_N drogato al carbonio. E' stato poi misurato, per la prima volta in letteratura, il campo di rottura dell'AlN, risultato essere pari a 3.2 MV/cm. La statistica di rottura ha seguito una distribuzione di Weibull. Infine, sono stati stimati i livelli energetici delle trappole che caratterizzano la seconda eterostruttura, AlGa_N/AlN.

Indice

1	Introduzione	7
2	Dispositivi analizzati e setup di misura	11
2.1	Dispositivi analizzati	11
2.2	Setup sperimentale	14
3	Osservazioni sperimentali	17
3.1	Meccanismi di conduzione	17
3.2	Recovery del secondo campione	32
3.3	Meccanismi di breakdown	47
3.4	Meccanismi di breakdown: constant voltage stress	51
4	Conclusioni	53
	Bibliografia	55

_S

Capitolo 1

Introduzione

I transistor HEMT basati su tecnologia GaN sono dispositivi molto promettenti nel range di tensione tra i 200 V e i 1200 V: grazie all'alto campo elettrico di rottura del GaN, che supera i 3 MV/cm, i dispositivi possono sopportare alte tensioni, mostrando un'eccellente robustezza nella condizione di OFF-state. Inoltre, la crescita del GaN su un substrato di silicio (con gli opportuni layer intermedi a causa dell'elevato mismatch reticolare), migliora la resa del processo e riduce i costi del dispositivo finale.

L'ottimizzazione del buffer è un obiettivo critico nella progettazione dei transistor di potenza GaN-on-Si attuali. La perdita verticale attraverso gli strati epitassiali che si ha quando il dispositivo deve sostenere alte tensioni nello stato di OFF limita l'efficienza delle soluzioni circuitali nelle quali viene posto il dispositivo, contribuendo alle perdite totali del sistema nel quale lo stesso dispositivo opera appunto, come ad esempio un convertitore switching. Inoltre, la corrente di leakage limita l'affidabilità del dispositivo, riducendone la robustezza verticale e quindi il tempo di vita del dispositivo stesso, portandolo precocemente a rottura.

Compresa l'importanza delle perdite verticali che interessano una struttura che costituisce lo scheletro di un GaN-on-Si HEMT, si capisce il motivo per il quale il fine di tale elaborato sia quello di comprendere il ruolo che giocano i diversi layer nella conduzione verticale, la quale deve essere minimizzata in modo da avere poco leakage (alta efficienza e affidabilità del dispositivo finale).

L'esperimento della «buffer decomposition» si pone allora come obiettivo l'analisi e lo studio della corrente di perdita verticale e dei meccanismi di breakdown che riguardano lo stack epitassiale che costituisce la possibile struttura di un HEMT di potenza standard, basato su tecnologia GaN-on-Si.

Per comprendere se le variazioni registrate in corrispondenza a più stress test in tensione consecutivi (che simulano sollecitazioni elettriche che il dispositivo finale deve sostenere all'interno di convertitori switching) sono dovute a degrado permanente o a fenomeni transitori viene condotta anche un'indagine sui fenomeni di intrappolamento all'interno del buffer, problematica molto sentita in questo tipo di dispositivi.

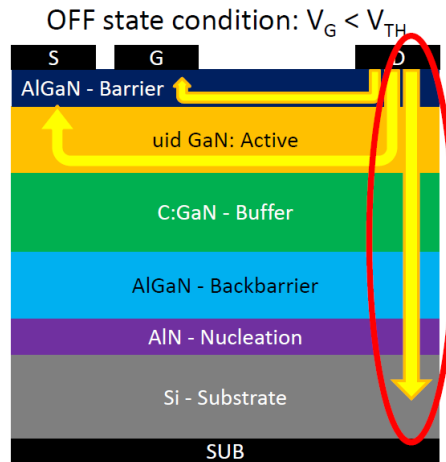


Figura 1.1: Struttura dell'HEMT di potenza interessato dal nostro lavoro di analisi. Si evidenzia la corrente di perdita verticale, la quale interessa i campioni testati in questo esperimento.

Di seguito viene riportata una sequenza riassuntiva delle diverse tipologie di misurazioni effettuate sui dispositivi e per quali campioni sono state messe in atto. Questo può darci un'idea più chiara, schematica, di quello che è stato il lavoro svolto.

1. Studio dei meccanismi di conduzione che avvengono all'interno delle diverse eterostrutture:
 - (a) I-V preliminari su tutti i 6 campioni. La tensione è stata portata fino a rottura del dispositivo. Per ogni campione sono stati testati 3 diversi dispositivi.
 - (b) I-V al variare della temperatura (30°, 50°, 70° e 90°C) su tutti i 6 campioni.
 - (c) I-V di breakdown (limite superiore dell'intervallo di tensione applicata in corrispondenza della rottura del dispositivo). Misura effettuata a 2 diverse temperature, 30° e 170°C sui campioni 1 (AlN/Si), 2 (Al_{0.70}Ga_{0.30}N/AlN/Si) e 4 (fino allo strato di C-doped GaN).
 - (d) I-V con upward e backward sweep in tensione (è stato applicato uno sweep in tensione crescente immediatamente seguito da uno sweep in tensione decrescente - stesso intervallo di tensione applicata, percorso prima in una direzione e poi in quella opposta). Misura eseguita a 30° e a 150°C su tutti i campioni. Ci si è focalizzati sullo studio delle curve in corrente ottenute per i campioni 1, 2, 3 e 4.
 - (e) I-V sul campione 3 (Al_{0.18}Ga_{0.82}N) al variare della temperatura (da 30° a 150°C con step di 20°C).
2. Analisi del recovery sul campione 2 (Al_{0.70}Ga_{0.30}N/AlN/Si). Questa fa parte ancora dello studio dei meccanismi di conduzione, ma è stato uno studio molto approfondito, per questo merita una sezione esclusiva.
 - (a) I-V con upward e backward sweep in tensione, ripetuta 9 volte su uno stesso dispositivo del campione 2.

- (b) I-V con upward e backward sweep in tensione, con diversi intervalli di tensione applicata. Si è partiti dall'intervallo minimo (0, 10V) e si è arrivati fino a (0, 60V).
 - (c) I-V con upward e backward sweep in tensione, ripetuta dopo un periodo di riposo del dispositivo pari a 65 ore.
 - (d) I-V con upward e backward sweep in tensione, ripetuta dopo un periodo di riposo pari a 3 ore. Misura effettuata applicando 3 diversi intervalli di tensione: (0, 30V), (0, 60V) e (0, 80V). Ogni intervallo è stato applicato su un diverso dispositivo dello stesso campione.
 - (e) Misura della corrente che attraversa la struttura applicando impulsi in tensione di 60V, ripetuti periodicamente ogni 15 secondi, per un totale di 14 ore di stress test.
 - (f) Misura della corrente che attraversa la struttura applicando impulsi in tensione di 40V, ripetuti periodicamente ogni 10 secondi, per un totale di 1000 secondi (equivalenti a 16 minuti e 40 secondi) di stress test. La misura è stata ripetuta variando l'ampiezza dell'impulso di tensione: 45V, 50V, 55V, ed infine a 60V.
 - (g) I-V pre e post periodo di riposo al buio di 1 ora, di un determinato dispositivo del secondo campione.
 - (h) I-V pre e post irraggiamento per 30 minuti dello stesso dispositivo per mezzo di una sorgente di luce a diverse lunghezze d'onda: 365, 385, 395, 405 e 420 nm utilizzando LEDs UV; in seguito a 447, 470, 505, 530, 590, 630, 700 e 760 nm per mezzo di LEDs LUXEON Rebel.
3. Studio dei meccanismi di breakdown (in particolare calcolo di tensione media di rottura e di campo elettrico medio al breakdown, o campo elettrico critico medio).
- (a) I-V fino a rottura del dispositivo, eseguita sui campioni 1 (AlN/Si), 2 ($\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}$) e 4 (C-doped GaN), a diverse temperature: 30°, 100° e 170°C.
 - (b) Constant Voltage Stress sul campione 1 (AlN/Si). Un gruppo di 12 stress a tensione costante sono stati forniti ad altrettanti dispositivi, polarizzando gli stessi a 50V, e portandoli quindi a rottura.

Capitolo 2

Dispositivi analizzati e setup di misura

2.1 Dispositivi analizzati

I dispositivi analizzati e studiati nel periodo di tesi sono costituiti da semplici eterostrutture verticali, le quali, in un secondo momento, andranno a costituire l'ossatura di transistor HEMT basati su tecnologia GaN-on-Si per applicazioni di potenza. Le eterostrutture che vanno a costituire i campioni analizzati sono state realizzate partendo dalla struttura più semplice (formata dal substrato in silicio seguito da uno strato di nucleazione in nitrato di alluminio) arrivando fino alla struttura completa, la quale costituisce un possibile scheletro di un HEMT basato su tecnologia GaN-on-Si.

Per questo l'intero lavoro è stato denominato "Buffer Decomposition": le 6 diverse strutture studiate sono state ottenute seguendo un processo di crescita epitassiale e interrompendolo a diversi stadi. In altre parole siamo andati ad analizzare e studiare la conduzione all'interno di una possibile struttura di un power HEMT scomponendola in strutture più semplici. Possiamo immaginare di aver seguito un processo di crescita epitassiale, dove ad ogni step ci siamo fermati ed abbiamo analizzato lo stack formato fino a quel punto.

Procediamo quindi con lo studio e l'analisi partendo dalla struttura più semplice (e significativa ovviamente), procedendo a mano a mano verso quella più complessa (quella completa), dove ad ogni stadio vengono aggiunti in cima allo stack epitassiale uno o più livelli di materiale diverso.

Su ogni scheggia di wafer dataci da analizzare, sono presenti un numero variabile di celle contenenti i dispositivi sui quali effettuare i nostri test (come si evince dall'esempio di figura 2.1). Ciascuna scheggia in dotazione, quindi, è costituita da più celle, ognuna delle quali contiene più dispositivi misurabili singolarmente, grazie ai contatti isolati individuati all'interno della stessa. In figura 2.2 viene riportata la maschera che caratterizza ogni cella di ciascuno dei 6 campioni.

Ogni dispositivo termina quindi con un contatto ohmico che serve per collegare la parte superiore dello stack epitassiale che lo caratterizza al parameter analyzer, e permetterci così di effettuare sullo stesso i test desiderati.

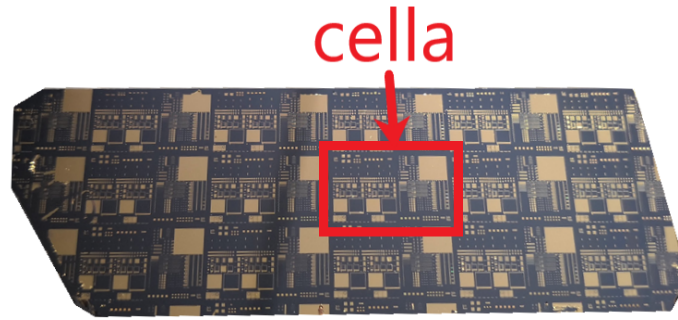


Figura 2.1: Porzione di wafer nel quale si trovano i dispositivi corrispondenti alla quarta eterostruttura (campione numero 4, sigla EP18 2 1930 1). La scheggetta si suddivide in più celle, ciascuna strutturata secondo la “mask description” vista in seguito.

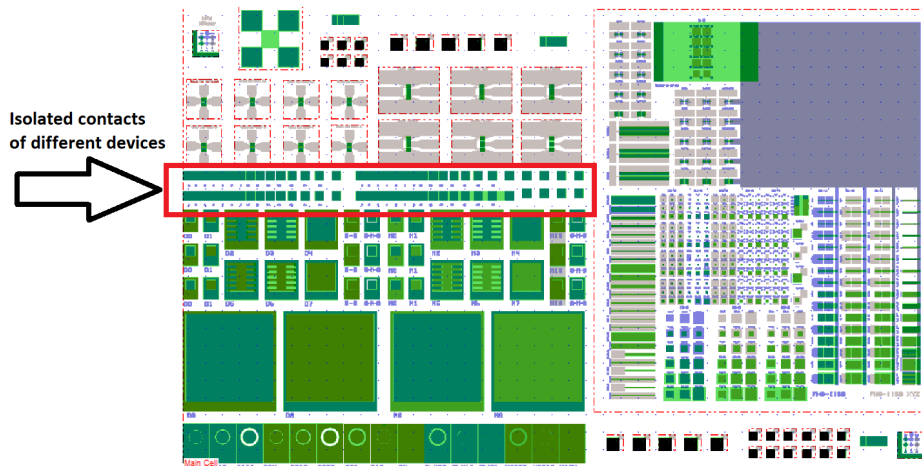


Figura 2.2: Mask description di una singola cella. Ciascuna scheggetta è suddivisa in più celle, ciascuna caratterizzata da tale maschera. Al suo interno vi si trovano i contatti ohmici dei dispositivi da testare.

In questo lavoro vengono testati e studiati 6 diversi campioni. Nelle figure 2.3 e 2.4 vengono presentate le strutture verticali che vanno a comporre i 6 diversi campioni.

Il campione 1 (EP18 2 1924 1) consiste in uno strato di AlN, cresciuto epitassialmente su un substrato di silicio, drogato per mezzo di boro, quindi di tipo p .

Il secondo (EP18 2 1925 1) ha una struttura simile al campione precedente ma, sopra lo strato di AlN, viene cresciuto un layer di $Al_{0.70}Ga_{0.30}N$.

Si segue così il processo di crescita epitassiale dello stack GaN-on-Si, interrompendolo a differenti step per ottenere gli altri campioni, fino ad arrivare alla struttura completa, che caratterizza il campione numero 6 (EP18 2 1928 1). Tra il substrato in silicio e la regione attiva del dispositivo sono presenti diversi strati che permettono di ottimizzare le prestazioni e di limitare gli effetti parassiti.

Per limitare le problematiche riguardanti il mismatch reticolare tra substrato in silicio e GaN, viene promossa la deposizione di uno o più opportuni strati sottili, tipicamente in AlN o Al-GaN, il cui insieme è detto nucleation layer. Questo rende più graduale la variazione delle costanti reticolari.

Il nucleation layer in AlN serve, quindi, ad evitare la propagazione di crack e a migliorare la

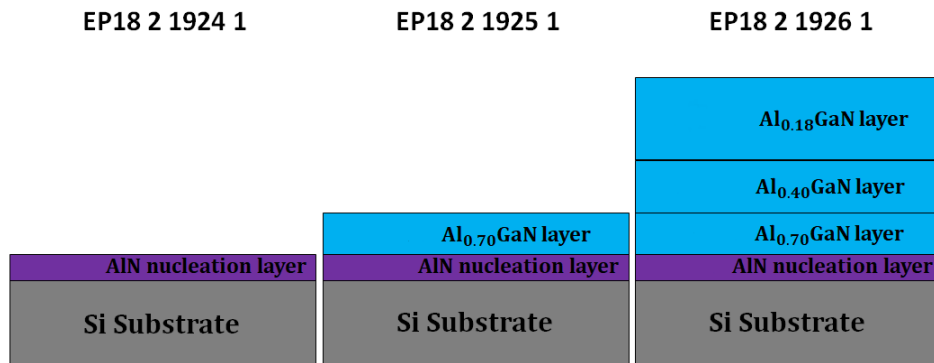


Figura 2.3: Strutture verticali relative ai primi 3 campioni.

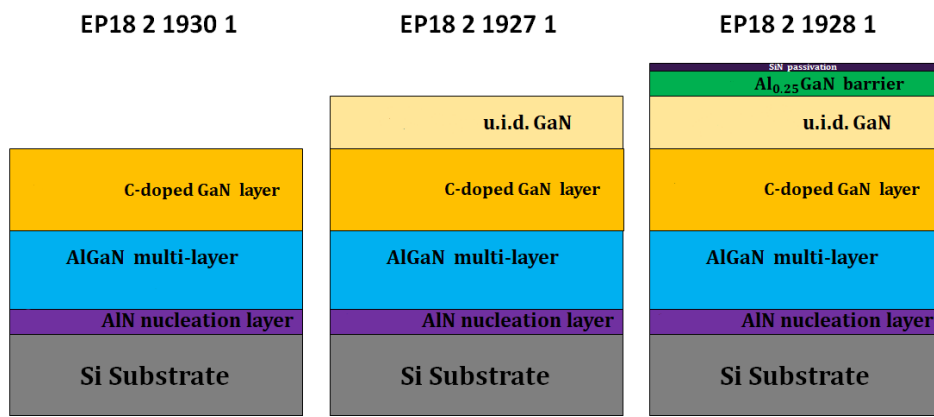


Figura 2.4: Strutture verticali relative agli altri 3 campioni.

qualità del reticolo in prossimità del canale. Per le applicazioni di power switching la crescita epitassiale su substrato comincia allora con uno strato di nucleazione in AlN, seguito da un buffer composto da diversi strati di AlGaN (variando la concentrazione di Al nel materiale), il cui scopo, ripetiamo, è quello di contenere lo stress termico e reticolare che la crescita diretta di GaN su silicio provocherebbe.

Segue un C:GaN blocking layer che serve appunto (da ciò la denominazione blocking layer) a ridurre il leakage tra drain e source, e tra drain e substrato in un Power GaN HEMT. Le impurità come il carbonio vengono aggiunte al buffer per renderlo più resistivo. La conseguenza indesiderata della loro presenza in un GaN HEMT è che l'aggiunta di trappole elettroniche possa portare alla dispersione di portatori mobili dal canale (della regione attiva). È a questo proposito critico il controllo della densità e la separazione fisica delle trappole dal canale.

La struttura completa presenta inoltre la regione attiva in GaN, dove si forma il canale di gas elettronico 2D, e lo strato barriera in AlGaN come previsto dall'architettura di un HEMT.

2.2 Setup sperimentale

Per effettuare in modo corretto le nostre misurazioni i dispositivi devono essere protetti dalla luce esterna o da disturbi elettromagnetici e meccanici. Con questo fine tutte le prove sono state effettuate all'interno di una probe station, ovverosia un contenitore metallico che per il dispositivo funge da gabbia di Faraday e come isolamento dello stesso dalla luce esterna. La probe station di cui ci siamo serviti, inoltre, è in grado di assorbire vibrazioni prodotte dall'ambiente esterno.

La strumentazione utilizzata per le nostre misurazioni è consistita principalmente, quindi, in una probe station all'interno della quale appunto siamo andati a contattare il dispositivo, e in un parameter analyzer *Keysight B1505A* che ci ha permesso di effettuare i test sui campioni. Le schegge di wafer sono state posizionate su un chuck mobile. I dispositivi sono stati contattati con micropunte DC, connesse al parameter analyzer attraverso cavi triassiali. Le punte sono state montate su dei micromanipolatori che ci hanno consentito lo spostamento lungo le tre direzioni spaziali con una adeguata precisione.

Il parameter analyzer *Keysight B1505A* è uno strumento costituito da due o quattro SMU (Source Monitor Unit), che possono essere di tre tipi:

- i. medium power SMU;
- ii. high power SMU;
- iii. high voltage SMU.

Ogni SMU è sia in grado di fornire che di misurare tensione e corrente con definiti tempi di integrazione. Le tipologie di SMU sopra citate si differenziano per la sensibilità di misura e il range di tensione/corrente applicabile.

La HV-SMU ci ha consentito di misurare la corrente che attraversa i diversi campioni durante polarizzazione degli stessi (tensione applicata anche molto elevata, lo strumento in questione è in grado di arrivare a 3kV). Il substrato delle strutture testate, nelle nostre misure, è sempre stato collegato a massa. I campioni poggiavano su una superficie conduttiva, la quale veniva contattata da una punta, che montata su un micromanipolatore si collegava attraverso cavo biassiale alla massa dello strumento. La HV-SMU utilizzata è limitata a $\pm 3\text{kV}$ e 4mA. Il parameter analyzer, inoltre, può essere connesso al PC attraverso un cavo GPIB, mediante il quale viene controllato per mezzo di un apposito software Virtual Instrument (VI) sviluppato in ambiente LABview. In realtà si può fare tutto ciò anche direttamente dallo strumento. Il programma è in grado di fare sweep di tensione (spazzolata di un intervallo di valori di tensione) per ricavare caratteristiche I-V. I dati ottenuti sono stati poi elaborati mediante foglio di calcolo elettronico per ricavare i relativi grafici da analizzare con attenzione.

Per effettuare le misure sui dispositivi in dotazione abbiamo utilizzato due punte: la prima è stata posizionata sul contatto ohmico Ti(40 nm)/Au(20 nm) costruito mediante fotolitografia in cima alla eterostruttura interessata, la seconda invece è stata disposta in modo da contattare la superficie conduttiva sulla quale poggiava il substrato del dispositivo analizzato (il substrato è stato sempre collegato a massa nelle nostre misure). Le punte sono state montate su dei

micromanipolatori che ci hanno permesso lo spostamento lungo i tre assi dello spazio; con l'utilizzo dei due cavi triassiali BNC le abbiamo collegate al nostro analizzatore parametrico.

Le misure al variare della temperatura sono state effettuate per mezzo di un riscaldatore ceramico controllato dallo strumento denominato Thorlabs TC 200.

Infine gli stress in tensione costante sono stati eseguiti con un Keithley 2410, uno strumento sorgente di alta tensione limitato a 1.1kV, 20mA.

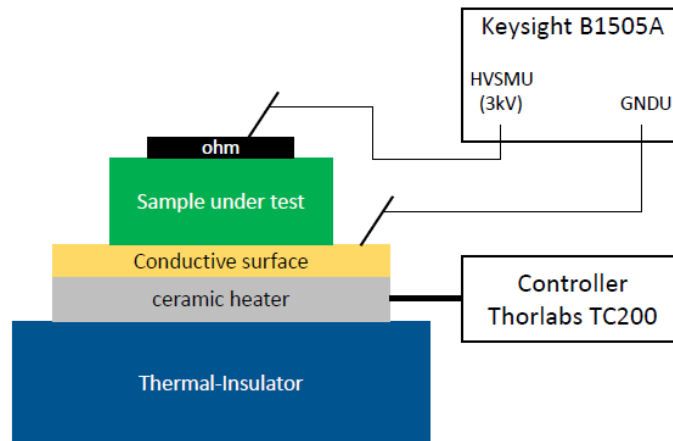


Figura 2.5: Esempio di setup sperimentale. Questo schema fa riferimento ad un setup disposto per effettuare misure I-V in temperatura.

Capitolo 3

Osservazioni sperimentali

3.1 Meccanismi di conduzione

Uno dei principali obiettivi di questo lavoro di tesi è stato quello di analizzare e studiare i meccanismi di conduzione che si attivano all'interno di strutture che costituiscono una possibile ossatura di HEMT basati su Nitruro di Gallio. Tanto per cominciare, per avere un'idea di ciò che avviene all'interno dei buffer che vanno a costituire tali campioni, riportiamo delle semplici misure I-V preliminari (misure di corrente, applicando una tensione ai capi del dispositivo), facendo arrivare la tensione fino alla rottura (breakdown) del dispositivo. In figura 3.1 riportiamo tali misure, effettuate su tre diversi dispositivi per ognuno dei campioni dati.

Facendo un'analisi di partenza delle curve I-V realizzate a temperatura ambiente, notiamo subito che vi è un notevole incremento della robustezza del dispositivo quando la crescita epitassiale arriva fino allo strato al nitruro di gallio drogato con carbonio. Questo fatto risulta ancor più ovvio osservando la figura 3.2, dove abbiamo raccolto in un unico grafico le tensioni a cui è avvenuta la rottura per ogni dispositivo analizzato, per ogni campione dato.

In seguito abbiamo effettuato delle misure di corrente al variare della tensione applicata, ripetute sempre sullo stesso dispositivo, scegliendo (con attenzione, in base anche alle misure di breakdown appena visualizzate) un intervallo di valori di tensione tale che lo stesso dispositivo non arrivasse a degradarsi in modo irreversibile, o addirittura a rompersi, portandolo a temperature di lavoro diverse: partendo dai 30°C, i quali rappresentano verosimilmente la temperatura ambiente, siamo arrivati fino a 90°C, procedendo a step di 20°C. Queste misure sono raccolte in figura 3.3; da una rapida indagine delle curve risultanti si rileva immediatamente come all'aumentare della temperatura vi sia un aumento circa costante della corrente che attraversa la struttura sotto test.

Per approfondire lo studio dei possibili meccanismi di conduzione che interessano i diversi strati che compongono i dispositivi, vediamo ora di analizzare le curve di corrente ottenute su alcuni campioni (quelli che ci hanno permesso di ottenere le osservazioni più interessanti) in seguito ad una elevata variazione in temperatura: prima a temperatura ambiente, successivamente a 170°C. In figura 3.4 vengono riportate tali misure, eseguite su due diversi dispositivi trovatesi all'interno dello stesso campione: la struttura che prevede il nucleation layer al nitru-

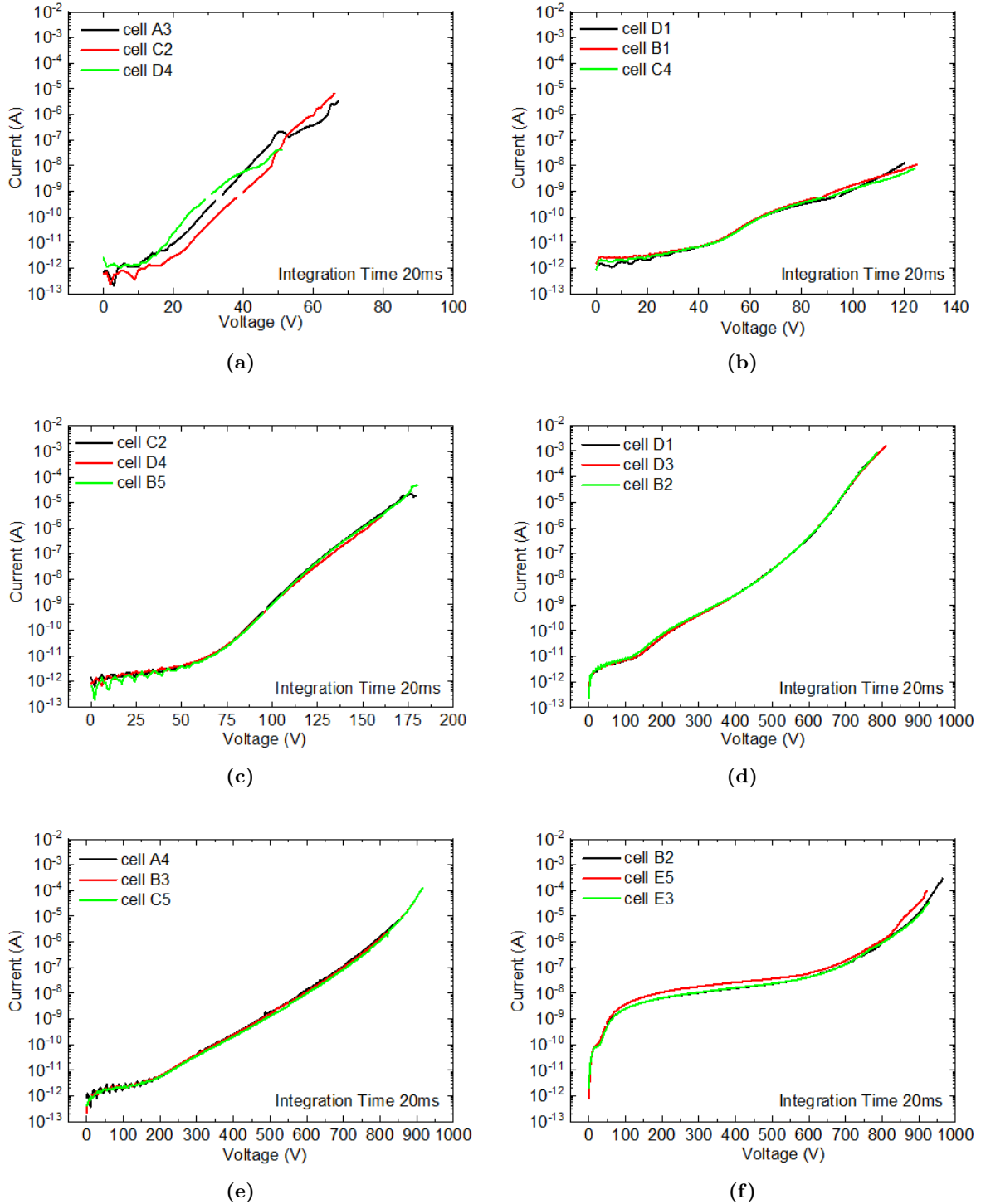


Figura 3.1: I-V fino a rottura del dispositivo, effettuate sui 6 diversi campioni (in ordine crescente di complessità strutturale).

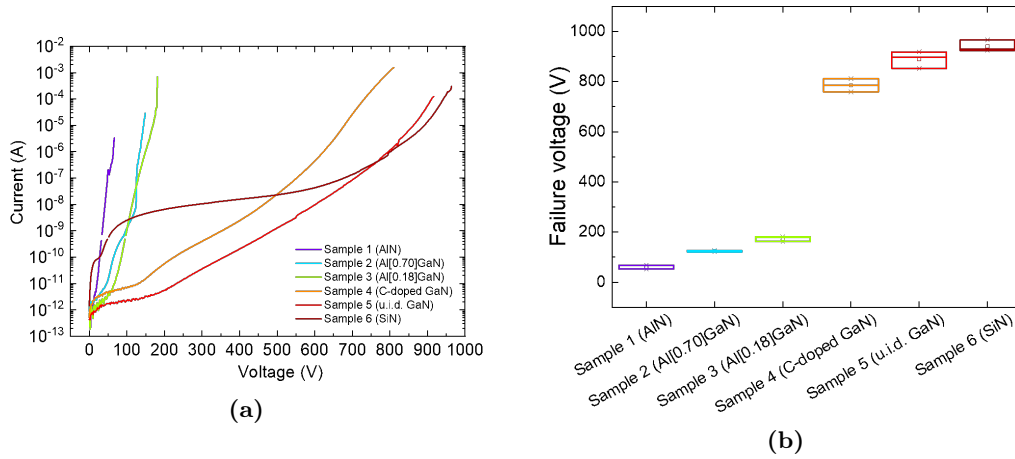
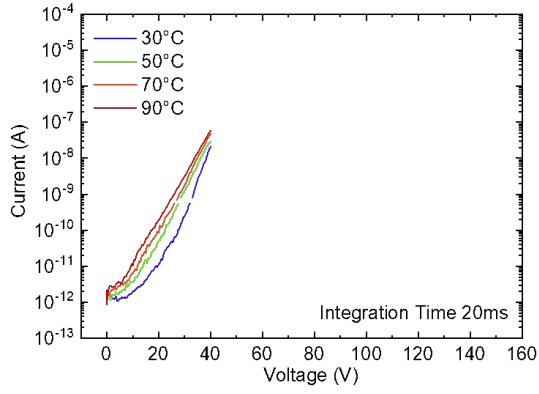


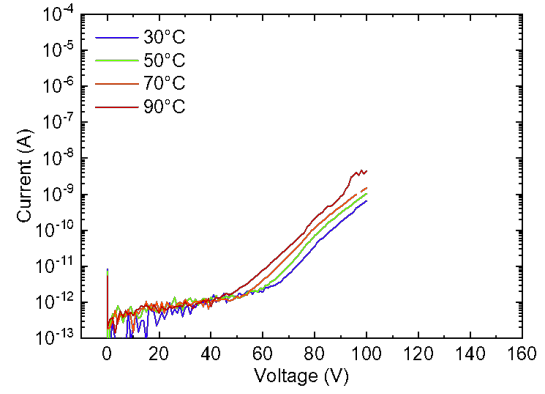
Figura 3.2: (a) I-V di BD di 6 diversi dispositivi, ciascuno rappresentativo di 1 campione; (b) confronto tra le tensioni al guasto mostrate dai diversi campioni.

ro di alluminio cresciuto sopra un substrato di silicio con drogaggio di tipo p. La tensione in questo caso è stata portata fino al valore di rottura del dispositivo. La figura 3.5 ci suggerisce il possibile diagramma a bande di energia approssimato che rappresenta il profilo energetico della struttura AlN/Si-sub, propria del campione numero 1, alla quale è applicata una polarizzazione diretta. Il nitruro di alluminio, dato l'elevato energy gap che presenta (pari a circa 6.2eV), si comporta in modo simile ad un dielettrico, per questo le bande di energia che lo caratterizzano vengono approssimate con linee rette (in un isolante ideale il campo elettrico è costante). Applicando una tensione elevata (positiva) alla struttura in questione, all'interfaccia tra nucleation layer e substrato ci troviamo nella condizione di inversione: vicino alla giunzione il p-Si si svuota di lacune, il livello intrinseco, piegandosi, va sotto il livello di Fermi, comportando così la presenza di elettroni mobili, quindi carica negativa libera, all'interfaccia (la quale si somma alla carica negativa fissa degli ioni di drogante). La conduzione all'interno di questa struttura è caratterizzata da due processi in serie: una iniezione mediante tunneling dal substrato in silicio verso l'AlN, e una conduzione attraverso i difetti presenti nell'AlN. Ricordiamo che la conduzione attraverso i difetti presenti all'interno degli strati epitassiali è un processo che dipende tendenzialmente dalla temperatura; mentre il processo di iniezione mediante effetto tunnel dipende debolmente dalla temperatura alla quale si trova il dispositivo. Nel caso del campione 1 la caratteristica I-V non dipende dalla temperatura (la curva risultante a 170°C differisce poco dalla curva ottenuta a 30°C), il quale significa che il processo prevalente è quello relativo alla iniezione attraverso effetto tunnel dal substrato allo strato di nucleazione. Essendo una serie di due meccanismi, la corrente totale è definita dal meccanismo limitante, quello che fa passare meno corrente. Il termine prevalente in questo caso, quindi, sta per limitante la conduzione di corrente.

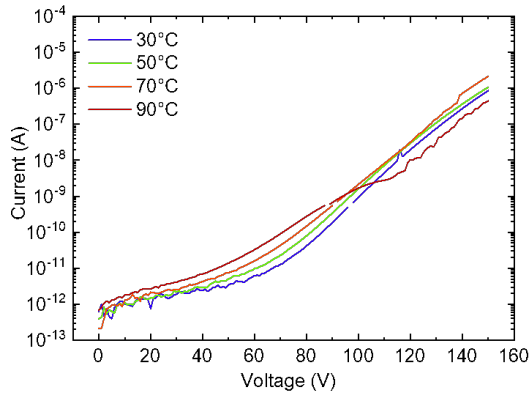
Il campione successivo (la crescita epitassiale è stata incrementata di uno step: viene aggiunto uno strato di nitruro di gallio di alluminio con concentrazione di gallio pari al 70%) manifesta un comportamento diverso dal primo al variare della temperatura: in figura 3.6 vengono riportate le curve I-V, eseguite su due diversi dispositivi trovatesi all'interno dello



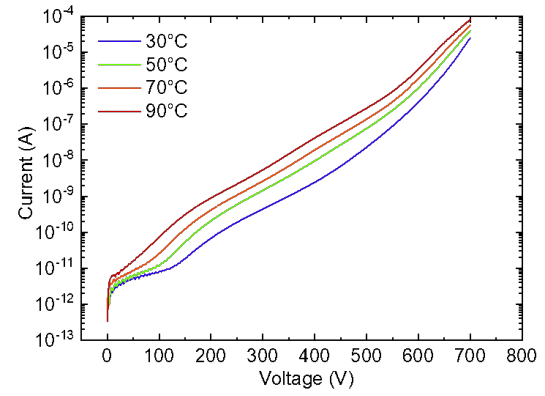
(a)



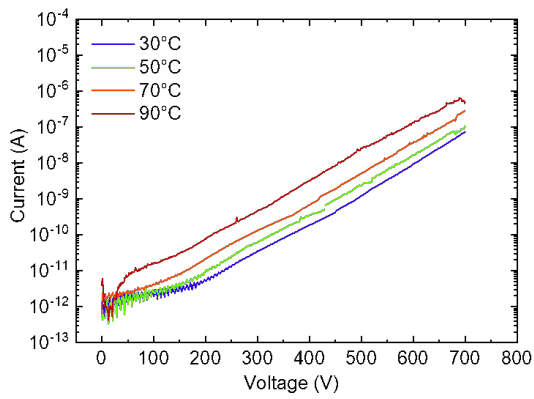
(b)



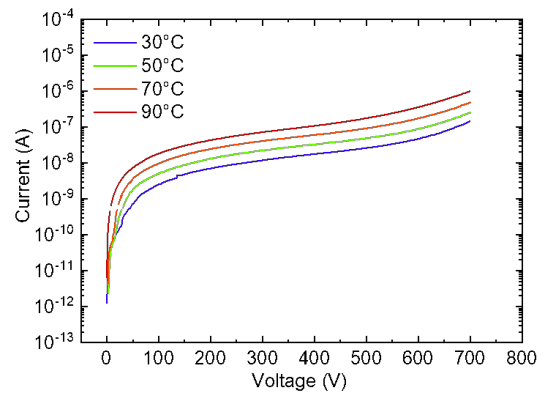
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.3: I-V al variare della temperatura. L'ordine delle figure segue la complessità crescente dei diversi campioni.

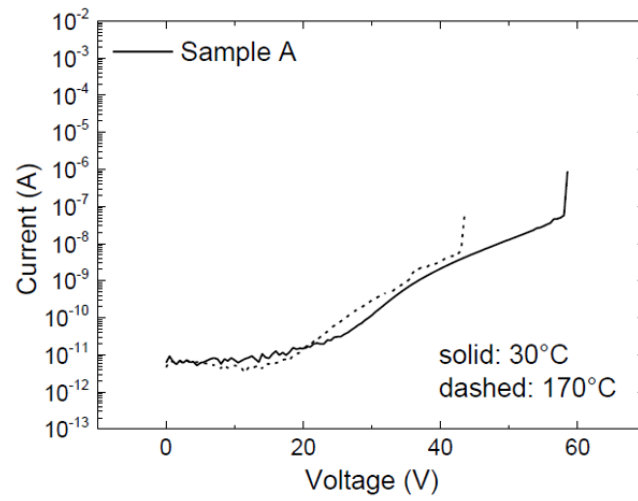


Figura 3.4: I-V di breakdown, eseguita a 30°C e a 170°C, mostrata dal campione 1 (AlN/Si-sub).

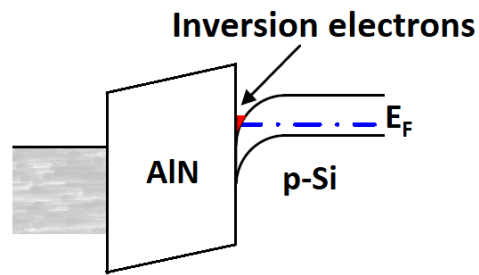


Figura 3.5: Diagramma a bande di energia relativo al campione 1 (AlN/Si-sub).

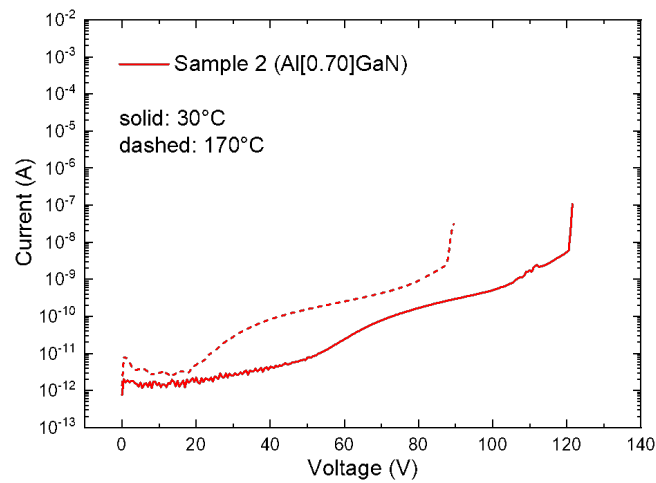


Figura 3.6: I-V di breakdown, eseguita a 30°C e a 170°C, mostrata dal campione 2 ($\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si-sub}$).

stesso campione, a due diverse temperature: 30°C e 170°C . Anche in questo caso la tensione è stata portata fino alla rottura del dispositivo stesso. Analizzando il grafico risultante a 30°C , si riescono a distinguere in modo netto almeno due regioni, in una delle quali la corrente espressa su scala logaritmica presenta un andamento lineare al variare della tensione; mentre nella seconda regione si osserva un considerevole incremento della corrente (sempre tenendo ben presente che stiamo parlando di una grandezza, la corrente, espressa su scala logaritmica). Questo ci induce a pensare che nell'intorno del valore di tensione applicata nel quale si verifica tale cambiamento repentino di pendenza, avvenga un cambiamento nelle dinamiche dei meccanismi di conduzione. Inoltre, osserviamo che questa variazione nell'andamento della corrente avviene ad una tensione molto più bassa se il dispositivo si trova a lavorare ad una temperatura molto più elevata (20V a 170°C contro i circa 55V del caso precedente, ovvero a 30°C).

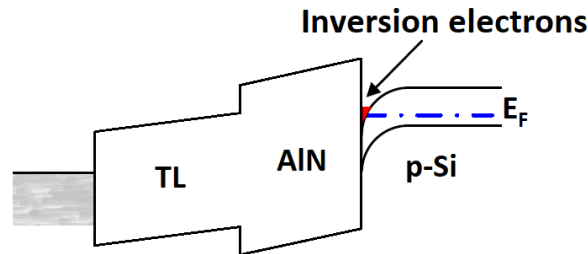


Figura 3.7: Diagramma a bande di energia relativo al campione 2 ($\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si-sub}$).

La figura 3.7 suggerisce il possibile diagramma a bande di energia approssimato che rappresenta il profilo energetico della struttura $\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si-sub}$, propria del campione numero 2, alla quale è applicata una polarizzazione diretta. La conduzione attraverso questo campione è caratterizzata da tre processi in serie: iniezione mediante tunneling (dal substrato al nucleation layer), conduzione attraverso i difetti nell'AlN e conduzione attraverso i difetti nello strato di AlGa_{0.30}N (questi ultimi due processi sono dipendenti dalla temperatura come detto in precedenza). Osservando le due caratteristiche tensione-corrente effettuate a 30°C e a 170°C si vede che la corrente, inizialmente, presenta un andamento lineare (corrente espressa su scala logaritmica) rispetto alla variazione di tensione, relativo ad un meccanismo che domina la conduzione alle basse tensioni, per poi lasciare spazio, nell'intorno di una determinata tensione, il cui valore decresce all'aumentare della temperatura, ad un meccanismo che si attiva e diviene processo prevalente nella conduzione di corrente. Siamo portati a pensare che il primo processo sia relativo all'iniezione attraverso tunneling dal substrato allo strato di nucleazione dei portatori di carica. Ipotesi questa che parrebbe trovare conferma nel fatto che, confrontando le due curve ottenute, il livello di corrente, tra i 0 e i 20V, cresca di poco, sebbene l'aumento notevole della temperatura. Mentre pensiamo che il secondo processo sia dovuto alla conduzione attraverso difetti all'interno degli strati di AlN e di AlGa_{0.30}N, visto che la corrente incrementa in modo considerevole all'aumentare della temperatura.

Considerando il diagramma a bande della struttura in figura 3.7 e pensando di applicare una tensione elevata sul contatto ohmico (dalla parte, quindi, del TL), si arriva ad una situazione nella quale le bande del metallo si sono abbassate di molto dalla parte del contatto ohmico,

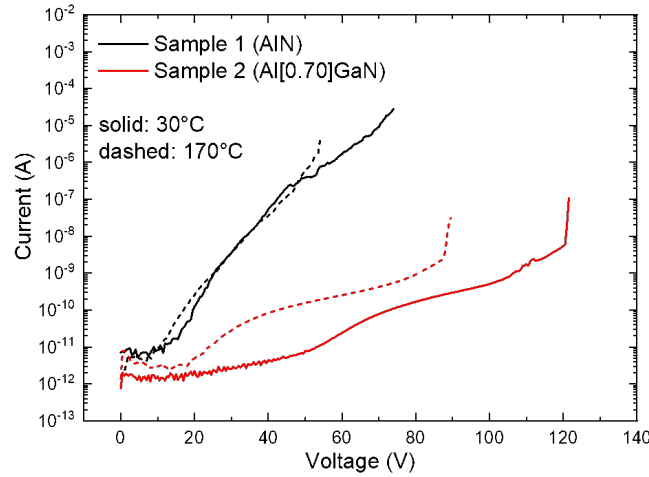


Figura 3.8: Confronto tra I-V relative al campione 1 e I-V mostrate dal campione 2.

e l'effetto tunnel da strato di inversione a strato di AlN diviene molto più probabile per i portatori di carica liberi presenti all'interfaccia. Si deduce ciò dato che diminuisce lo spessore della barriera di potenziale che devono attraversare gli elettroni per passare dal substrato ad un qualsiasi livello disponibile nel buffer. Tenendo presente, inoltre, che l'AlGaN ha una densità di difetti più bassa rispetto a quella dello strato di AlN, si arriva alla conclusione che, superata una determinata tensione, il meccanismo che limita la corrente in questo dispositivo è la conduzione all'interno dello strato di AlGaN. Ci si potrebbe chiedere per quale motivo, nel campione precedente, nelle caratteristiche tensione-corrente, non si osserva un andamento della corrente relativo ad un meccanismo di conduzione attraverso difetti nello strato di nucleazione. Per rispondere a questa domanda si deve tener presente che si arriva alla rottura del dispositivo a tensioni molto più basse rispetto al secondo campione, quindi, non abbastanza elevate da permettere l'attivarsi di altri processi conduttivi. Inoltre, il primo campione è formato dal solo strato di nitrato di alluminio (sopra il substrato), che abbiamo detto avere un elevato grado di difettosità, quindi probabilmente abbastanza elevato da non rendere tale processo limitante la conduzione totale, nel range di tensioni possibili prima del guasto del dispositivo.

In figura 3.8 è stato riportato un confronto tra le misure del primo e del secondo campione: andando ad aggiungere un primo livello dello stack che va a costituire il transition layer intero, vediamo che il livello di corrente si abbassa notevolmente, a partire fin dalle tensioni applicate più basse.

Proseguendo la crescita epitassiale di due step, arriviamo al campione numero 4 (saltiamo dal secondo al quarto per il momento), nel quale lo stack che costituisce il Transition Layer è completo, inoltre sopra di esso viene depositato uno strato di nitrato di gallio, il quale viene drogato con del carbonio. In figura 3.9 vengono riportate le curve della corrente ottenute al variare della tensione applicata, per due diverse temperature alla quale i due diversi dispositivi, uno per ciascuna misura, sono stati testati. Facciamo notare subito che la tensione alla quale avviene la rottura del dispositivo è più alta nel caso in cui lo stesso si trova a lavorare ad una temperatura più elevata. Questa osservazione è importante, e verrà approfondita in seguito, quando si andranno a studiare i meccanismi di breakdown che interessano i diversi

dispositivi. La figura 3.10 raffigura il possibile diagramma a bande di energia approssimato proprio della struttura C-doped GaN/AlGaN multi-layer/AlN/Si-sub, che va a costituire il campione numero 4, alla quale è applicata una polarizzazione diretta.

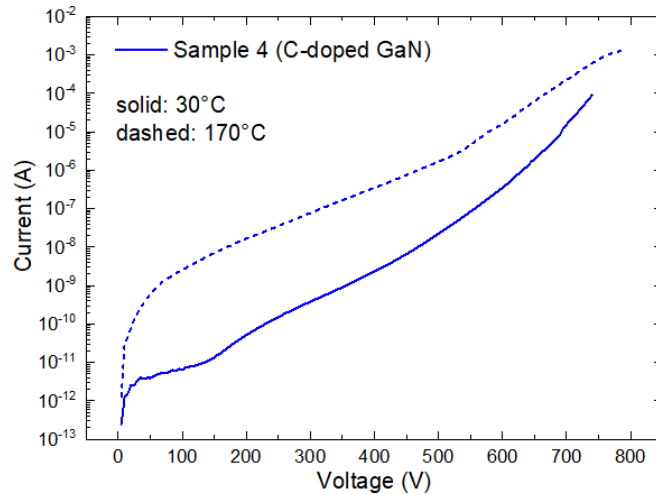


Figura 3.9: I-V di breakdown, eseguita a 30°C e a 170°C, mostrata dal campione 4 (C-doped GaN).

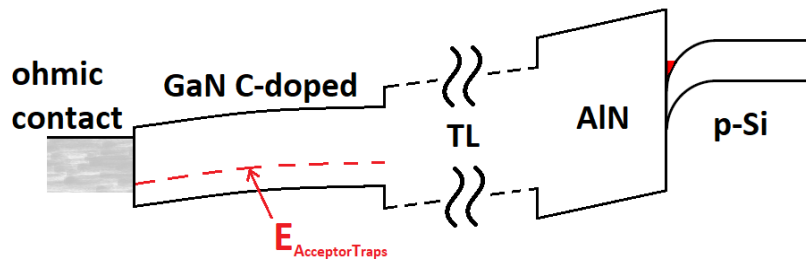


Figura 3.10: Diagramma a bande di energia relativo al campione 4 (C-doped GaN).

La conduzione attraverso questo campione è caratterizzata da tre processi in serie, come nel caso del campione n.2 ma, rispetto a quest'ultimo, si aggiunge pure un processo in parallelo: la conduzione per lacune dovute allo strato GaN drogato con il carbonio. In questo caso la corrente di leakage è data principalmente dalle lacune introdotte dal drogante presente nello strato di nitruro di gallio. Le lacune possono trovarsi intrappolate all'interno dell'epi-stack, incrementando così l'iniezione di elettroni dal substrato. Le lacune dallo strato GaN drogato C vengono iniettate negli strati AlGaN e, successivamente, attraversando pure il Nucleation Layer, finiscono nel substrato dove si ricombinano con gli elettroni (dello strato di inversione). La disponibilità delle lacune è dipendente dalla temperatura: all'aumentare di questa aumenta anche il numero di lacune disponibili.

Dopo una prima "spazzolata" di semplici misurazioni al variare della temperatura, portando la tensione fino al valore di rottura, e di conseguenti osservazioni preliminari, continuiamo con lo studio dei meccanismi di conduzione che avvengono all'interno dei buffer che compongono i diversi dispositivi, eseguendo ulteriori misure I-V applicando, stavolta, uno sweep in tensione crescente fino ad un determinato valore di tensione, scelto coerentemente con le tensioni di rottura viste in precedenza (in questo caso l'intenzione è stata quella di non avvic-

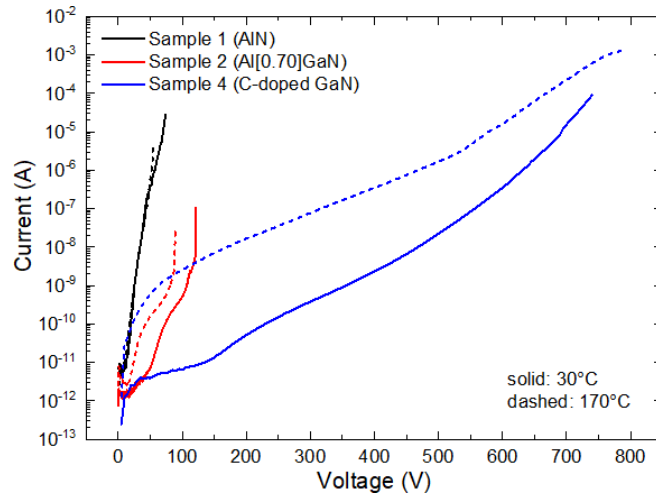


Figura 3.11: Confronto tra le I-V, a temperatura ambiente e ad alta temperatura, mostrate dai campioni 1, 2 e 4.

narsi al guasto del dispositivo ed evitare, quindi, una degradazione irreversibile dello stesso), seguito poi da uno sweep in tensione all'indietro. Attraverso questo tipo di misurazione si può procedere con un'analisi qualitativa dei meccanismi di "trapping" e "detrapping" della carica libera all'interno del buffer, anche grazie ad uno studio contemporaneo dei diagrammi a bande di energia (approssimati) dei dispositivi analizzati. In figura 3.12 riportiamo le curve in corrente risultanti dagli sweep in tensione crescente e decrescente applicati, effettuate prima a temperatura ambiente (30°C), e ad una temperatura di lavoro pari a 150°C poi.

Proseguiamo con un'analisi dettagliata relativa alle misure della corrente (con spazzolata crescente e decrescente di un definito intervallo di valori della tensione) che attraversa il primo dispositivo (AlN/Si-sub). Analizzando struttura a bande di energia e curva di corrente risultante (in figura 3.13) dal test di questo dispositivo, siamo in grado di fare alcune osservazioni. Applicando una tensione progressiva, crescente, ai capi del dispositivo si verifica un piegamento delle bande di energia sempre più accentuato e lo svuotamento di lacune nel substrato di tipo p in prossimità dell'interfaccia con il nitruro di alluminio, con successiva inversione dello stato della carica libera. Quindi, gli elettroni liberi confinati all'interno dello strato di inversione possono attraversare lo strato di nitruro di alluminio grazie all'effetto tunnel.

In figura 3.14 troviamo un esempio di possibili meccanismi di conduzione per effetto tunnel da parte della carica mobile attraverso il nucleation layer. Dato lo spessore dell'AlN possiamo pensare che la carica elettronica lo attraversi, fino ad arrivare al contatto ohmico, per effetto tunnel con l'aiuto di trappole dello strato di nucleazione stesso (Trap Assisted Tunnel): i portatori vengono trasportati verso i contatti attraverso una serie di step (hopping) da una buca di potenziale alla successiva, in particolare da una dislocazione alla successiva. La densità di queste trappole è data dalla difettosità che presenta il materiale.

In figura 3.15 troviamo il diagramma approssimato di una buca di potenziale rappresentativa di una trappola (dal punto di vista del diagramma delle bande di energia), in presenza di un campo elettrico applicato. Vengono riportati tre possibili meccanismi di emissione dell'elettrone dalla trappola.

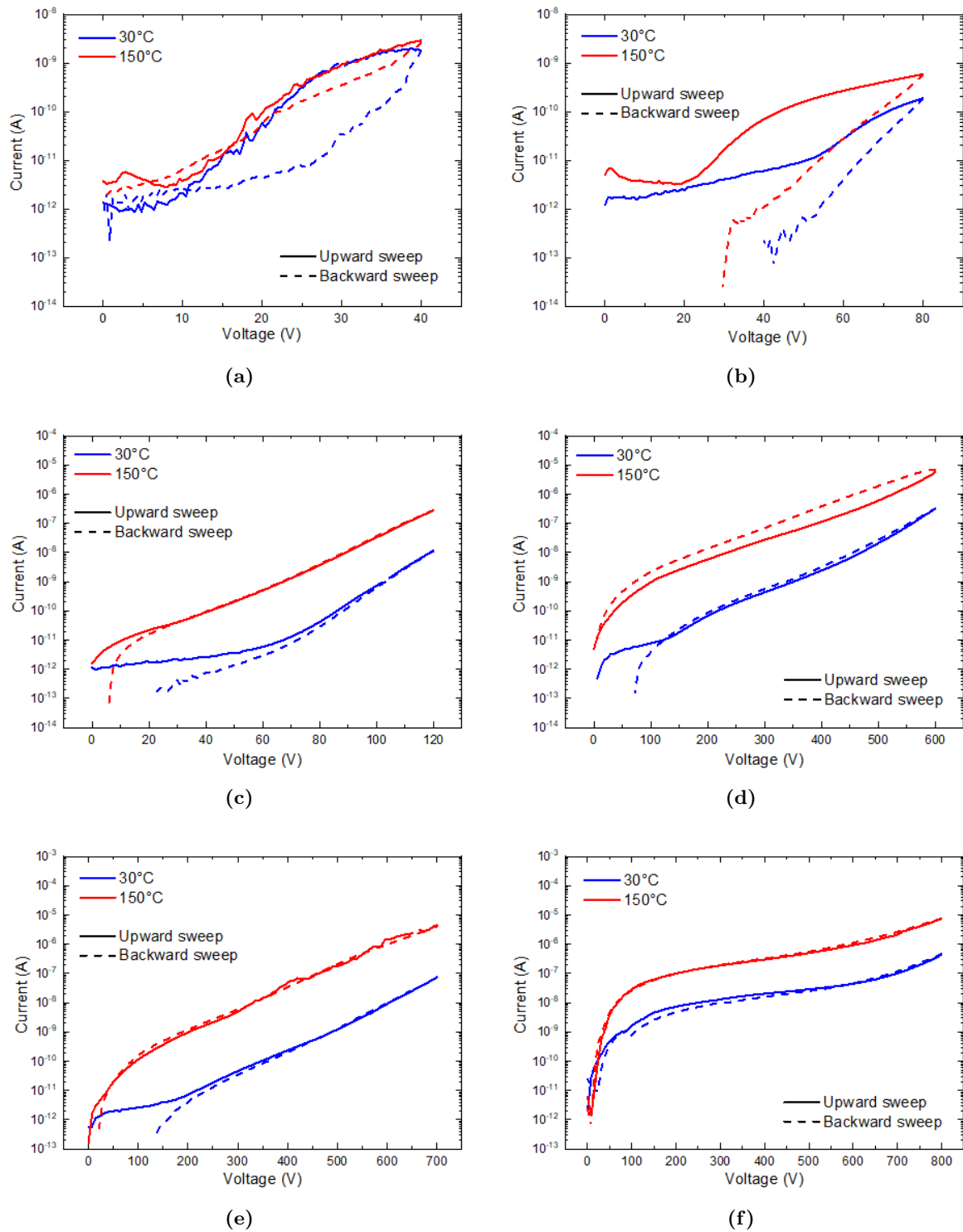


Figura 3.12: I-V, con upward e backward sweep in tensione, a temperatura ambiente e a 150°C, dei 6 campioni (le figure seguono l'ordine crescente di complessità strutturale).

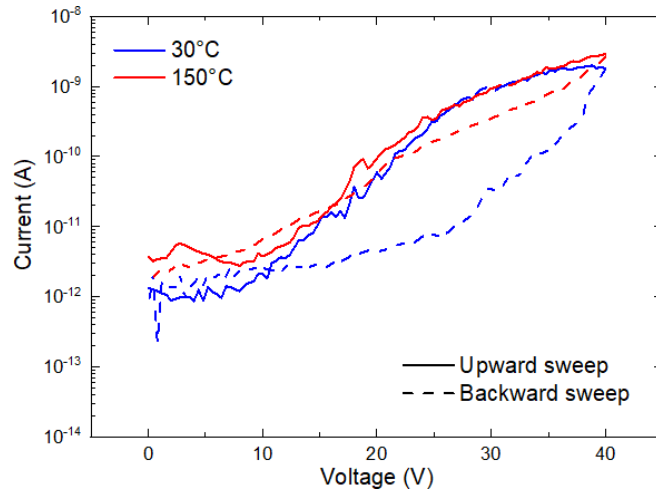


Figura 3.13: I-V, con upward e backward sweep in tensione, a temperatura ambiente e a 150°C, del campione 1 (AlN).

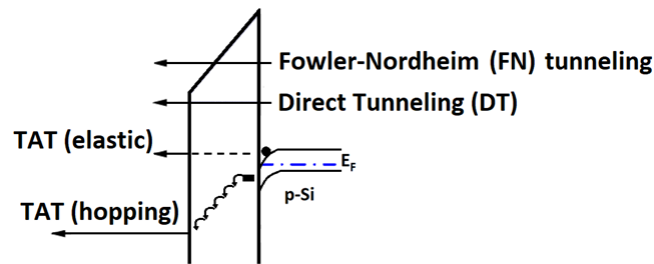


Figura 3.14: Diagramma a bande di energia relativo al campione 1, in cui vengono evidenziati i possibili fenomeni di tunneling che interessano il portatore di carica.

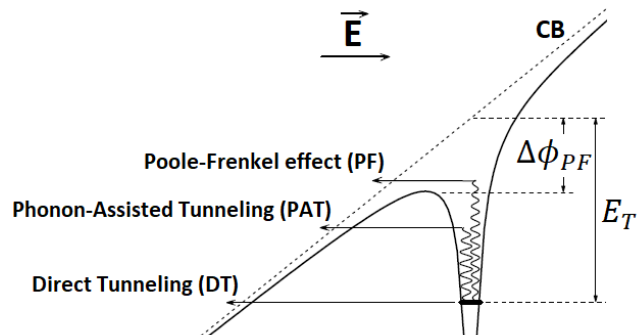


Figura 3.15: Diagramma a bande di energia di una buca di potenziale, rappresentativa di una trappola.

L'effetto Poole-Frenkel descrive l'incremento del tasso di emissione termica dei portatori di carica in presenza di un campo elettrico esterno (quindi di una tensione applicata), dovuto all'abbassamento della barriera di potenziale a cui si trovano, relativa ad esempio a un difetto o a una impurezza. Durante la spazzolata in tensione all'indietro, viene misurata una corrente molto inferiore (rispetto a quella misurata durante l'upward sweep), quindi si osserva una isteresi accentuata. Data l'alta difettosità del materiale dello strato di nucleazione, vi è una elevata densità di cariche intrappolate nel materiale stesso. Questo accentuato meccanismo di intrappolamento porta ad una minor iniezione di elettroni dal substrato nello stesso nucleation layer, quindi ad una corrente più bassa, quando andiamo ad applicare l'intervallo di valori di tensione all'indietro. Anche questo dispositivo ci dimostra come, nel caso del campione 1 (AlN/Si-sub), un aumento considerevole della temperatura non porta ad un aumento rilevante della corrente (durante l'upward sweep). Però, grazie alla misura di corrente durante il backward sweep in tensione, possiamo osservare come l'alta temperatura incrementi l'emissione termica dei portatori di carica che si trovano intrappolati nelle buche di potenziale relative a difetti del materiale. Infatti questo porta ad un livello di corrente nettamente superiore (rispetto alla misura fatta a 30°C, backward sweep in tensione), e quindi ad una isteresi molto meno accentuata a 150°C. Analizzando le curve di figura 3.12b, e più in particolare quelle ottenute per il campione successivo, nel quale viene aggiunto uno strato di AlGa_{0.30}N, si nota che l'isteresi è più accentuata ad una temperatura più elevata, contrariamente all'andamento nel caso del campione precedente. Ad una temperatura più elevata, nel caso del campione numero 2, molti più portatori di carica vengono coinvolti nel processo di conduzione durante l'upward sweep della tensione, rispetto al caso del campione numero 1 dove, invece, i valori di corrente alle due diverse temperature non si distanziano di molto. Quindi, siamo portati a concludere che, a temperature elevate, l'isteresi sia molto più accentuata nel caso dell'Al_{0.70}Ga_{0.30}N/AlN/Si-sub perché vi è un accumulo di gran lunga maggiore di portatori di carica intrappolati negli strati epitassiali. La conduzione di corrente, in questo caso, dopo una certa tensione, viene limitata dalla difettosità del primo livello dello stack che andrà a formare lo strato di transizione (Transition Layer), ovverosia del livello di Al_{0.70}Ga_{0.30}N. Il motivo di tale affermazione è dovuto al fatto che lo strato di nitruro di gallio di alluminio presenta una difettosità di minor entità rispetto a quella del nitruro di alluminio, ovverosia nello strato di AlGa_{0.30}N il trasporto elettronico è maggiormente limitato data la minor presenza di difetti del materiale.

Procedendo con l'analisi, passiamo al campione numero 4 (C-doped GaN/AlGa_{0.30}N multilayer/AlN/Si-sub) dove la crescita epitassiale arriva fino allo strato di nitruro di gallio drogato con il carbonio. Come è già stato detto in precedenza, la conduzione attraverso questo campione è caratterizzata da una corrente di elettroni alla quale va sommata una corrente di lacune dovute al carbonio nello strato GaN (i due processi si svolgono in parallelo). Grazie alle osservazioni seguenti giungiamo alla conclusione che in questo campione la corrente di leakage è data principalmente dalle lacune introdotte dal drogante presente. Inoltre, la disponibilità delle lacune è dipendente dalla temperatura: all'aumentare di questa aumenta anche il numero di lacune disponibili, e questo si evince anche dalle misure riportate in figura 3.12d.

Dalla stessa figura si osserva che il livello di corrente si alza durante la spazzolata in tensione

all'indietro. Le lacune iniettate verso i livelli che formano lo strato di transizione durante l'upward sweep in tensione, possono trovarsi coinvolte in un meccanismo di trapping all'interno dell'epi-layer e, questo, mentre si applica una tensione decrescente, favorisce l'iniezione di elettroni dal substrato, i quali probabilmente andranno a ricombinarsi con le lacune stesse. Tutto ciò risulterà, quindi, in una corrente più elevata durante lo sweep decrescente in tensione. Ripetendo la misurazione a temperature più elevate, un numero più alto di lacune viene coinvolto nel processo di conduzione (come si evince da figura 3.12d, infatti, il livello di corrente è più alto di circa due ordini di grandezza), questo porta ad un accumulo maggiore di lacune intrappolate negli strati intermedi (quindi, più elettroni richiamati a combinarsi dal substrato), il quale fa sì che anche l'isteresi risulti essere maggiore.

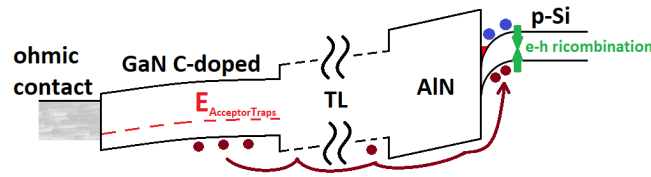


Figura 3.16: Diagramma a bande di energia relativo al campione 4, in cui viene evidenziata la corrente di lacune.

Osservando figura 3.12 si nota che, per quanto riguarda i campioni 3 (il caso più evidente), 4 e 5, la curva di corrente mostrata a 30°C presenta due differenti andamenti durante uno sweep in tensione crescente (corrispondenti questi ad altrettanti meccanismi di conduzione), mentre la curva ottenuta a 150°C è caratterizzata da un'unica pendenza, fin dalle tensioni più basse. Questa osservazione, espressa in modo qualitativo, ci ha portato ad effettuare misurazioni della corrente di perdita su un unico dispositivo del terzo campione, al variare della temperatura, procedendo stavolta a step di 20°C. Questo ci ha permesso di osservare come evolve la curva di corrente all'aumentare della temperatura.

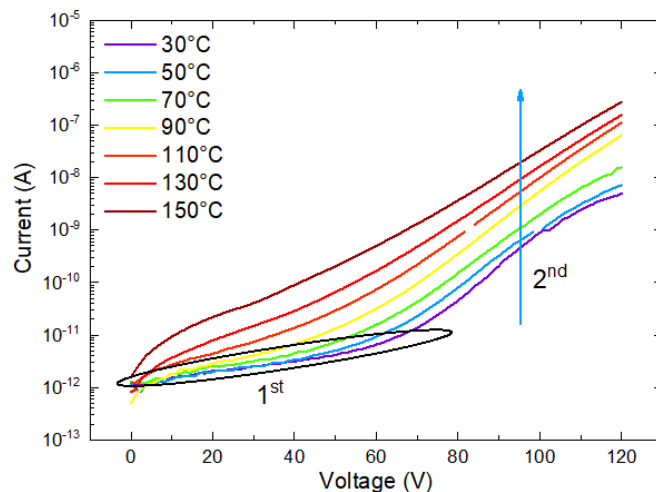


Figura 3.17: I-V al variare della temperatura su uno stesso dispositivo del campione 3.

Dal risultato di tale misurazione, riportato in figura 3.17, si può notare che il primo meccanismo di conduzione, prevalente alle basse tensioni, dipende debolmente dalla temperatura,

mentre il secondo meccanismo, attivato a tensioni più elevate, dipende fortemente dalla variazione della temperatura stessa, in quanto il livello di corrente si alza di molto ad ogni step. Inoltre, si osserva che la tensione alla quale il meccanismo dominante diventa il secondo, si sposta sempre più a sinistra sull'asse reale (tensioni sempre più basse) all'aumentare della temperatura.

Infine, osserviamo che, sebbene il campione numero 3 (il quale arriva fino allo strato di $\text{Al}_{0.18}\text{GaN}$) presenti una struttura più complessa rispetto al campione numero 2 ($\text{Al}_{0.70}\text{GaN}$), ad una temperatura di 150°C la curva di corrente si trova ad un livello più elevato (figure 3.18 e 3.19).

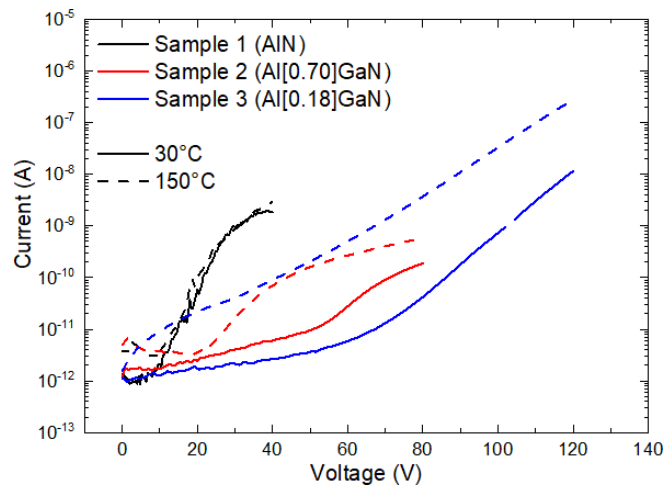


Figura 3.18: I-V effettuate sui campioni 1, 2 e 3 a temperatura ambiente e a 150°C .

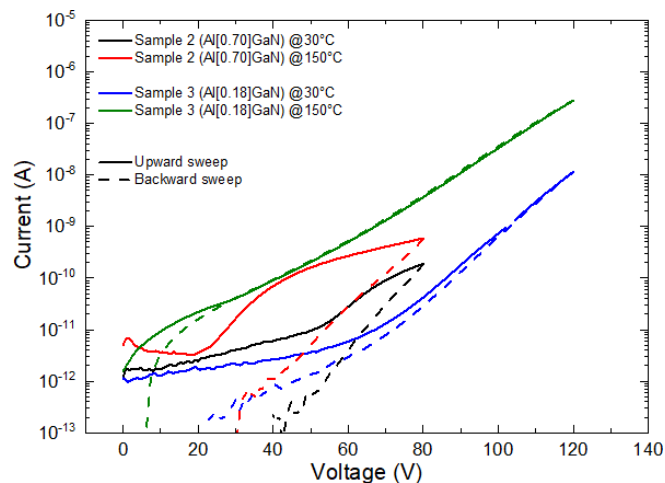


Figura 3.19: Focus sulle diverse curve presentate dai campioni 2 e 3 al variare della temperatura.

Da questo ultimo confronto tra le curve I-V dei campioni 2 e 3 siamo portati a pensare che una maggiore percentuale di gallio, in uno strato AlGaN all'interno del buffer che compone il back-barrier, abbia influenzato il risultato ottenuto dal test sul campione 3 a 150°C . Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che la crescita del gallio viene ottenuta a partire da composti

metallorganici (come ad esempio il trimetilgallio), i quali potrebbero essere sorgente di impurità (ad esempio carbonio), che abbiamo visto essere fonte di trappole accettori.

3.2 Recovery del secondo campione

Con lo scopo di studiare e comprendere meglio i fenomeni di *trapping* e *detrapping* all'interno del buffer che va a costituire le strutture analizzate abbiamo eseguito delle misure I-V successive, per tensioni crescenti e decrescenti, su uno stesso dispositivo. Questo ci ha consentito di analizzare i meccanismi di recupero verso la condizione di dispositivo fresh, ovverosia precedente ad ogni test.

Abbiamo eseguito tale tipo di misurazione sul campione numero 2 ($\text{Al}_{[0.70]}\text{Ga}_{[0.30]}\text{N}/\text{Al N}/\text{Si}$), i cui esiti sono riportati in figura 3.20.

Si può notare che, dopo la prima spazzolata in tensione (crescente) sullo stesso dispositivo, il livello della corrente decresce. Durante la prima misura la carica viene intrappolata all'interno della struttura: le cariche intrappolate creano una barriera di potenziale che limita l'iniezione di carica durante le rilevazioni a tensioni minori, e ciò avviene anche per le misure successive. Il fenomeno di trapping viene indotto dal primo sweep in tensione, e ciò si traduce in un livello di corrente più basso negli sweep in tensione successivi.

All'interno della regione indicata da un cerchio nero (per tensioni che arrivano fino a circa 60V) si vede che, una volta superata la prima misura, dal secondo sweep in tensione crescente, fino all'ultimo effettuato, il livello di corrente resta pressoché invariato. All'interno della regione delimitata dal cerchio viola (per tensioni comprese tra i 60V e gli 80V), il livello di corrente invece decresce ad ogni sweep successivo.

Si può, infine, osservare un "fast recovery", della durata temporale inferiore a 1 secondo, tra la fine di un backward sweep e l'inizio dell'upward sweep successivo (tale recovery, in figura, viene indicato dalla freccia verde).

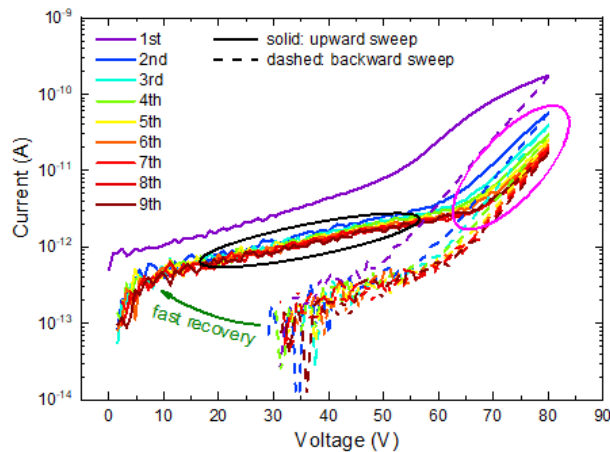


Figura 3.20: Misure I-V ripetute sul campione $\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}$

Sulla base delle osservazioni fatte in precedenza, relative ai meccanismi di conduzione all'interno di questo dispositivo, e osservando la figura relativa alla misurazione appena descritta, possiamo fare alcune osservazioni.

Dalle considerazioni fatte nei paragrafi precedenti possiamo pensare che il meccanismo che limita la conduzione alle basse tensioni sia relativo al tunnelling, o comunque ad un meccanismo

che non coinvolga la conduzione attraverso i difetti all'interno del buffer. Questo sembra trovare conferma nel test appena descritto dato che, per misure successive (dalla seconda in poi), il livello di corrente resta più o meno lo stesso all'interno dell'intervallo stimato in (0-60V).

Il meccanismo indotto alle alte tensioni (60-80V), invece, è relativo alla conduzione attraverso difetti all'interno del buffer: per misure successive il livello di corrente si abbassa sempre di più, perché evidentemente avviene un intrappolamento di carica sempre maggiore.

Osservando la figura relativa alla misura appena descritta, ci chiediamo quale tensione induce l'abbassamento irreversibile del livello di corrente che si vede tra la prima e la seconda misura. Per provare a rispondere a tale domanda organizziamo una misurazione in cui allo stesso dispositivo vengono applicati sweep successivi per intervalli di tensione crescenti (step di 10V), partendo dal range (0-10V) per arrivare fino all'intervallo (0-60V).

In figura 3.21 vediamo il risultato di tale misurazione. Prima di tutto, da questa misura, ricaviamo che per ogni sweep di tensione all'indietro, fin dalle tensioni applicate più basse, la corrente si abbassa per ogni step del test. Per quanto riguarda gli sweep di tensione in avanti, invece, si osserva un significativo abbassamento della corrente tra il secondo e il terzo intervallo di tensione applicati.

Questo significa che vi è una tensione inferiore o uguale a 20V (visto che l'effetto si vede nella misura successiva, la terza) che comporta un primo fenomeno significativo di intrappolamento di carica, che non si "cancella" nell'immediato. Proseguendo con gli step di misura si nota un assestamento del livello di corrente per un intervallo di tensioni compreso tra i 10 e i 40V per misure successive (dalla terza effettuata in poi). Arrivando poi fino all'ultimo step si comincia a intravedere un abbassamento della corrente per tensioni superiori ai 40V, tra una misura e la successiva. Questo può corrispondere ad un secondo processo di intrappolamento di carica indotto dalla spazzolata in tensione (0-50V).

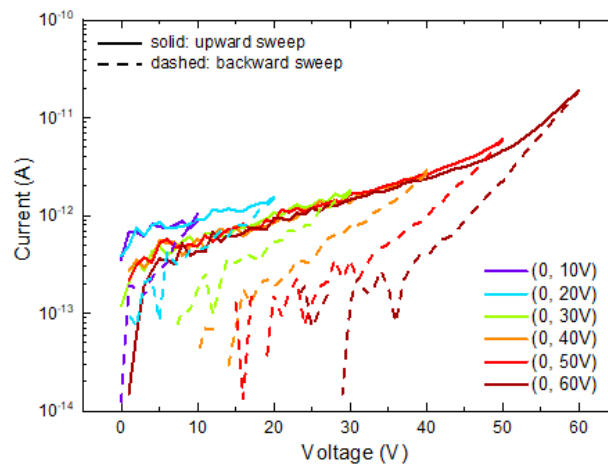


Figura 3.21: Confronto delle caratteristiche I-V per sweep crescenti e decrescenti su diversi intervalli di tensione.

Mettendo a confronto questa misura con la precedente, possiamo rispondere alla domanda che ci ha portati ad eseguire questo test: la tensione che induce l'abbassamento del livello di corrente osservato in precedenza sta tra i 10 e i 20V.

Infine, anche qui come in precedenza, ipotizziamo un secondo processo di conduzione limitante per tensioni superiori ai 50V. In questo caso si osserva un cambio di pendenza della curva di corrente in un intorno di tale valore di tensione e, inoltre, possiamo pensare che tale meccanismo di conduzione inneschi a sua volta processi di intrappolamento di carica che portano il livello di corrente ad abbassarsi continuamente per misure successive.

Fino a questo momento abbiamo analizzato il recupero del dispositivo verso la sua condizione iniziale, precedente ad ogni test, attraverso stress in tensione successivi, effettuati in rapida successione tra loro, al più variando gli intervalli di tensione applicata. Ora, invece, proponiamo un test nel quale il dispositivo (inizialmente *fresh*) viene testato effettuando due misure in tensione immediatamente successive e, in seguito ad un'attesa di 65 ore (2 giorni e 17 ore), ne viene effettuata una terza.

Questa tipologia di misurazione ci permette di verificare se gli effetti del test in tensione si presentano pure in seguito ad un lungo periodo di riposo del dispositivo.

Tale prova è utile, quindi, per valutare se e in quale misura gli effetti dell'intrappolamento di carica provocano una degradazione irreversibile della struttura epitassiale che costituisce il campione preso in considerazione. Ci chiediamo quindi, se l'intrappolamento di carica che si verifica in seguito ad un intervallo di tensione applicata causa un mutamento drastico delle caratteristiche interne al dispositivo, oppure se nel tempo lo stesso tenda a tornare verso la sua condizione iniziale, precedente ad ogni test.

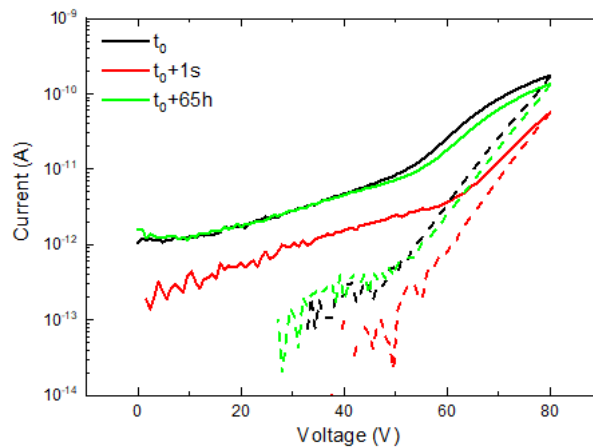


Figura 3.22: Misure di ripristino del secondo campione.

Il risultato di tale misura, visualizzato in figura 3.22, ci mostra come i test effettuati abbiano un'influenza sul comportamento del dispositivo anche in seguito ad un riposo di 65 ore. In particolare, gli effetti di intrappolamento di carica perdurano nel tempo per tensioni superiori a 40V, mentre si può affermare che il dispositivo si ripristina alla sua condizione *fresh* per tensioni inferiori a 40V.

Questo ci porta a supporre che i due diversi meccanismi di conduzione verificati in ogni misurazione fino a qui per tale campione, implicano processi di *trapping* che riguardano livelli energetici diversi: i primi, per tensioni inferiori a 40V, più superficiali; i secondi, per tensioni

superiori, interessano trappole che si trovano a livelli di energia più profondi, dove la carica intrappolata ha molte meno possibilità di liberarsi.

Ci chiediamo se sia necessaria un'attesa tanto lunga per vedere un parziale ripristino del dispositivo verso la condizione *fresh*.

Spinti da tale quesito ripetiamo la stessa tipologia di misurazione appena descritta, riducendo però il periodo nel quale il dispositivo viene lasciato a riposo. Dopo aver stabilito un periodo temporale di 3 ore tra il primo e il secondo test in tensione, abbiamo ripetuto la misura per tre diversi intervalli di tensione, ovviamente utilizzando un dispositivo nuovo (mai testato prima) per ogni diverso intervallo di tensione.

Inizialmente abbiamo applicato uno sweep (in entrambe le direzioni, crescente e decrescente) in tensione fino a 30V. Il risultato, visto in figura 3.23a, ci dimostra come, applicando tensioni molto basse, il dispositivo torni a presentare un comportamento molto simile a quello iniziale anche dopo un'attesa di sole 3 ore. Portando la tensione fino a 60V (figura 3.23b), vediamo come la curva presentata dopo 3 ore dal primo test cominci a mostrare i primi segni di una leggera degradazione del dispositivo.

Applicando invece un intervallo di tensione ben più ampio (0-80V) si vede molto bene l'effetto drammatico del primo test effettuato sul dispositivo, anche dopo un periodo di riposo di 3 ore. Nella regione A (0-40V) il dispositivo mostra un parziale recupero verso la condizione iniziale, mentre nella regione B (40-80V) vi sono segni evidenti di fenomeni di intrappolamento di carica, che vanno così a degradare il campione preso in esame.

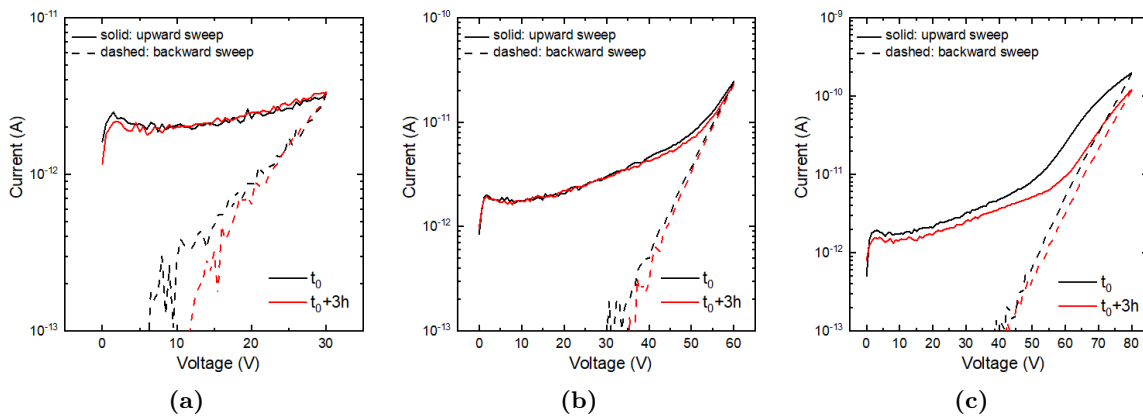


Figura 3.23: Test di recovery da misure precedenti. (a) Sweep di 30V. (b) Sweep di 60V. (c) Sweep di 90V.

Progettiamo, ora, un test nel quale ad un determinato dispositivo, dopo aver applicato uno sweep in tensione in entrambe le direzioni, viene applicato un impulso di ampiezza 60V e con periodo tra un impulso e l'altro pari a 15 secondi. L'obiettivo di tale test è sempre quello di fare un monitoraggio del transitorio di recupero verso la condizione iniziale del dispositivo.

Osservando il risultato ottenuto possiamo dire che, per la prima decina (circa) impulsi applicati, vi è un recupero parziale verso la condizione di dispositivo *fresh*, e tale recupero è costante tra un impulso e l'altro. Procedendo con il test, più aumenta la quantità di impulsi applicati e più il dispositivo si degrada e la corrente misurata scende verso il valore mostrato nello *sweep*

all'indietro, come se il periodo di riposo tra un impulso e l'altro non avesse più una funzione di tempo di recupero verso la condizione iniziale.

Concludiamo che, con un periodo di riposo tra un impulso e l'altro di 15 secondi, non è possibile monitorare un recupero del dispositivo verso la condizione *fresh*.

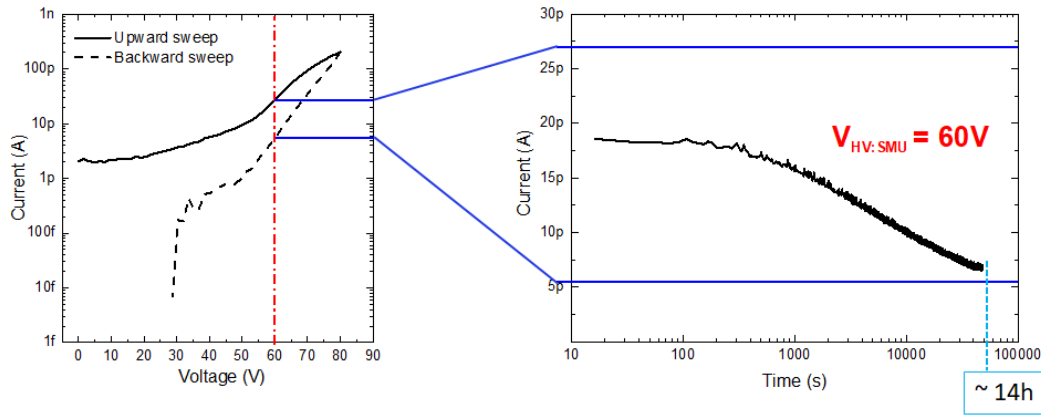


Figura 3.24: Test di recovery (fallito) a seguito di applicazione di un treno di impulsi di tensione a 60 V ogni 15 secondi.

Facciamo allora un ulteriore tentativo di monitoraggio del transitorio di recupero verso la condizione antecedente ogni test, procedendo con una tipologia di misura simile a quella precedente, dove però viene variata l'ampiezza in tensione degli impulsi applicati. Il nostro obiettivo sarebbe quello di trovare una tensione applicata che ci permetta di monitorare il transitorio nel tempo senza che gli impulsi applicati causino ulteriori effetti di intrappolamento di carica.

Osservando i risultati visualizzati in figura 3.25 è evidente un significativo decremento della corrente tra il primo e il secondo impulso praticato sul dispositivo, indipendentemente dalla tensione applicata. Questo probabilmente è dovuto all'effetto di intrappolamento di carica previsto per tensioni superiori ai 10V (già osservato in precedenza).

Analizzando le curve ottenute, inoltre, troviamo che la corrente decresce con continuità nel tempo se l'ampiezza degli impulsi impartiti è maggiore o uguale a 45V. Concludiamo, quindi, che per il secondo campione ($\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si-sub}$) la tensione critica alla quale si scatenava un processo di intrappolamento di carica più forte (che probabilmente coinvolge livelli energetici più profondi all'interno del buffer) è compresa tra i 40 e i 45V. Infine, se la tensione applicata al dispositivo non supera un valore critico compreso tra i 50 e i 60V (e alla quale diviene limitante per la conduzione di corrente un secondo meccanismo), il dispositivo è in grado di recuperare almeno parzialmente verso la condizione precedente ad ogni test (recupero che non avviene mai in modo completo a causa del primissimo processo di intrappolamento, visibile sempre, immediatamente dopo il primo test effettuato, per ogni intervallo di tensione applicata che superi i 10V).

Restiamo focalizzati sulle trappole e gli effetti che la presenza di esse comporta sul buffer che costituisce il nostro secondo campione, tenendo sempre ben presente che andrà poi

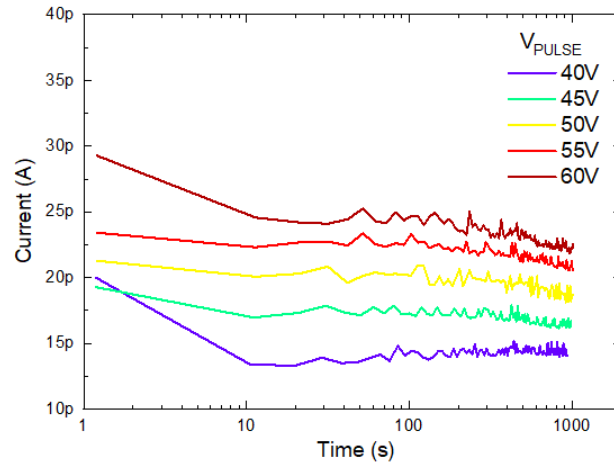


Figura 3.25: Test di recovery a seguito di applicazione di treni di impulsi a diverse tensioni.

ad essere elemento fondante di un AlGa_N/Ga_N HEMT. Un normale processo di generazione-ricombinazione di un portatore comporta una transizione completa tra la banda di conduzione e la banda di valenza, ma non è l'unico modo affinché si porti a compimento tale processo. Infatti uno stato trappola è uno stato non intenzionale che causa la cattura e/o l'emissione non voluta di un portatore. Lo stato trappola funziona, quindi, come un centro di generazione-ricombinazione localizzato, però, all'interno del band-gap del semiconduttore.

I fenomeni di intrappolamento nascono, quindi, dall'azione di tali centri di generazione-ricombinazione, relativi a difetti del materiale, i quali favoriscono la cattura di elettroni o di lacune. Se un portatore viene catturato in uno stato trappola, è necessaria un'energia esterna affinché esso venga emesso. Si può ottenere tale emissione mediante l'applicazione di un'energia termica, oppure con un'esposizione alla luce, quindi attraverso l'azione di fotoni che trasportano una determinata energia. Ed è proprio su quest'ultimo concetto che si basa la prossima tipologia di misura che andremo ad effettuare su un particolare campione (quello che abbiamo scelto di studiare più a fondo, ovvero il secondo: Al_{0.70}Ga_{0.30}N/AlN/Si-sub): ci serviamo di una sorgente di luce, con il fine di provocare il detrapping dei portatori di carica precedentemente catturati da stati trappola attraverso sweep in tensione. Il fine di liberare i portatori catturati

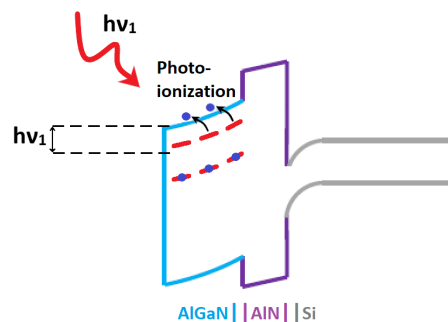


Figura 3.26: Diagramma energetico relativo alla fotoionizzazione.

dagli stati trappola, per mezzo di una sorgente di luce, è quello di arrivare ad avere qualche

informazione ulteriore sulla natura degli stessi stati trappola, che costituiscono una criticità propria dei diversi strati epitassiali che formano i nostri campioni. In particolare, sono determinanti riguardo ai meccanismi di conduzione che avvengono all'interno delle strutture fin qui analizzate. Per caratterizzare una trappola è necessario conoscerne il tipo di carica, l'energia di attivazione o di ionizzazione E_a , e la sezione trasversale di cattura σ .

Il test, i risultati del quale andremo ad analizzare e studiare ora, si basa sull'applicazione di uno sweep in tensione (crescente e decrescente) ad un determinato dispositivo del secondo campione ($\text{Al}_{[0.70]}\text{Ga}_{[0.30]}\text{N}$). L'intervallo di tensione per il quale abbiamo optato ci ha permesso di procedere con le misure senza che queste abbiano portato il dispositivo testato ad una degradazione drastica o alla sua rottura definitiva.

Lo sweep in tensione è stato applicato sulla stessa struttura $\text{AlGa}\text{N}/\text{AlN}$ per 3 volte, in seguito il dispositivo è stato irraggiato con una sorgente di luce di una determinata lunghezza d'onda per un periodo pari a 30 minuti. Successivamente, al *DUT* è stato applicato nuovamente lo stesso sweep in tensione. Tale procedura è stata eseguita più volte, testando sempre lo stesso pad (questo per ricavare dati non affetti da variabilità device-to-device), variando di volta in volta il dispositivo optoelettronico utilizzato per irradiare la eterostruttura, quindi variando la lunghezza d'onda propria della sorgente luminosa. In tabella 3.1 vengono riportate le lunghezze

UV LEDs	LUXEON Rebel Color LEDs
365 nm	447 nm
385 nm	470 nm
395 nm	505 nm
405 nm	530 nm
420 nm	590 nm
	630 nm
	700 nm
	760 nm

Tabella 3.1: LEDs utilizzati nel corso delle prove.

d'onda delle diverse sorgenti luminose adottate durante questo test. Si vuol far notare che per le prime 5 misure sono stati utilizzati 5 LED UV diversi ma dello stesso tipo, mentre per le successive 8 misure sono stati utilizzati 8 LED di tipo diverso dai precedenti. Per questo motivo abbiamo suddiviso i risultati ottenuti in due gruppi: le curve di corrente ottenute dallo stesso dispositivo prima e dopo irradiazione con luce di lunghezza d'onda pari a 365nm, 385nm, 395nm, 405nm e 420nm; e le curve di corrente ottenute intervallando test in tensione e irradiazione con luce di 447nm, 470nm, 505nm, 530nm, 590nm, 630nm, 700nm e 760nm.

Sfruttando le conoscenze (riguardanti i campioni) in nostro possesso siamo in grado attraverso questo tipo di test di stimare i livelli energetici ai quali si possono trovare densità significative di stati trappola.

Per avere un'indicazione della variazione delle curve di corrente prima e dopo irradiazione con sorgenti di luce di diverse lunghezze d'onda, abbiamo considerato la differenza tra i due

valori di tensione alla quale la corrente è pari a 10^{-11} A (per lo sweep crescente e per quello decrescente). Inoltre, per avere un'ulteriore indicazione di quanto la struttura abbia recuperato le proprie caratteristiche antecedenti ad ogni test in seguito all'esposizione dell'emissione elettromagnetica, abbiamo preso in considerazione anche il picco di corrente che attraversa il dispositivo quando la tensione ad esso applicata raggiunge il limite superiore dell'intervallo da noi scelto, ovverosia 80V.

Prima di fare alcune considerazioni facciamo una doverosa ed importante premessa: per tutte le misure di recovery pre e post irraggiamento è stato scelto e testato un unico dispositivo rappresentativo del secondo campione ($\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si-sub}$). Questo per ottenere risultati che non fossero influenzati dalla variabilità device-to-device. Allo stesso tempo la struttura in questione è stata sottoposta a più bias stress consecutivi, quindi bisogna tenere presente che essa può aver subito degradazioni più o meno rilevanti mano a mano che si procedeva con i test su di essa. Detto questo, il dispositivo in questione è stato inizialmente sottoposto ad uno stress in tensione (crescente e decrescente), dal quale è stata ricavata la curva di corrente del campione *fresh*.

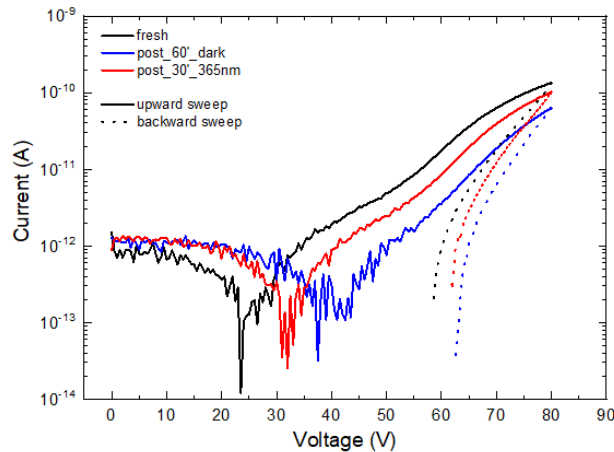


Figura 3.27: I-V pre e post periodo di riposo di 60 minuti e pre e post periodo di irraggiamento a 365nm per un intervallo di tempo pari a 30 minuti. Le due curve vengono confrontate con la curva I-V presentata dal dispositivo in condizioni iniziali.

Con riferimento alla figura 3.27, in seguito ad un periodo di riposo pari ad 1 ora, nel quale la struttura è stata tenuta al buio, è stata effettuata una nuova misura, dal quale abbiamo ricavato la curva "post_60'_dark". Successivamente abbiamo testato il dispositivo altre 2 volte prima di sottoporlo ad irraggiamento, per opera di una sorgente di luce LED UV con lunghezza d'onda pari a 365nm, per un tempo pari a 30 minuti. Terminata tale irradiazione, al dispositivo è stato nuovamente applicato uno sweep in tensione, ottenendo così la curva "post_30'_365nm".

Dalla figura 3.27, notiamo immediatamente un ripristino parziale della eterostruttura verso la condizione *fresh* se irraggiata per 30 minuti con la sorgente di luce a 365nm. Notiamo la differenza rispetto alla curva ottenuta in seguito ad un periodo di riposo al buio di tempo

doppio. Grazie all'energia trasportata dai fotoni della luce a 365nm, le cariche mobili intrappolate all'interno degli strati epitassiali vengono liberate, così la struttura torna, sempre in modo parziale, ad una composizione vicina a quella che la caratterizzava precedentemente ad ogni test.

Dalla tabella 3.3, che raccoglie i valori di corrente misurata a 80V, si nota che dall'irraggiamento con luce a 395nm in poi (verso lunghezze d'onda sempre maggiori) il recupero non raggiunge nemmeno più il livello di corrente che si era raggiunto in seguito ad un periodo di riposo al buio di 1 ora.

Si deve tenere sempre in considerazione però che il dispositivo arriva al test post irraggiamento a 395nm, con almeno 15 bias stress effettuati in precedenza sullo stesso.

Il differenziale in tensione presentato dalla curva post irraggiamento a 395nm, però, è più ampio rispetto a quello visto nel caso della curva di corrente mostrata dopo un'ora di riposo al buio (8.69V vs 5.82V). Questa probabilmente è un'indicazione di come il dispositivo abbia in realtà detrappolato maggiormente in seguito a esposizione elettromagnetica rispetto all'ora di buio, contrariamente a ciò che si può pensare osservando solamente i valori di corrente raggiunti a 80V.

Per questo abbiamo considerato due "parametri" per effettuare considerazioni sul recovery del dispositivo. La cosa più ovvia, dimostrata dalle misure sperimentali, è che con irraggiamento per mezzo di sorgenti di luce con lunghezze d'onda via via più grandi, il valore di corrente che attraversa il dispositivo a 80V diminuisce continuamente. Questo a dimostrazione del fatto che i fotoni costituenti l'emissione elettromagnetica di una sorgente di luce con lunghezza d'onda maggiore trasportano un'energia minore, e quando vanno ad incidere sull'eterostruttura trasmettono un'energia minore ai portatori di carica intrappolati, comportando un minor effetto di *detrapping* all'interno del buffer durante l'esposizione alla radiazione.

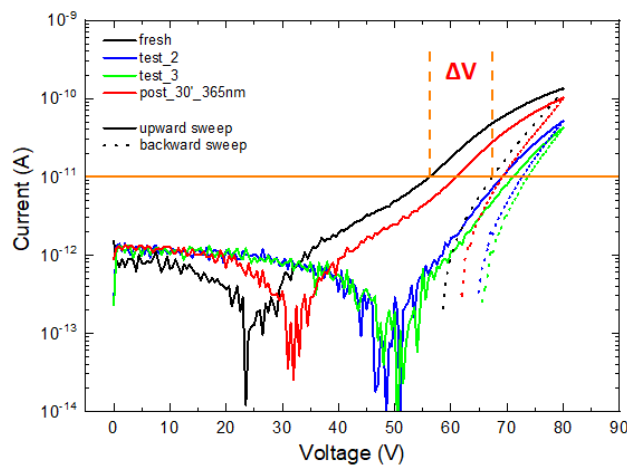


Figura 3.28: I-V pre e post irraggiamento a 365nm confrontata con quella presentata dallo stesso dispositivo in condizione *fresh*.

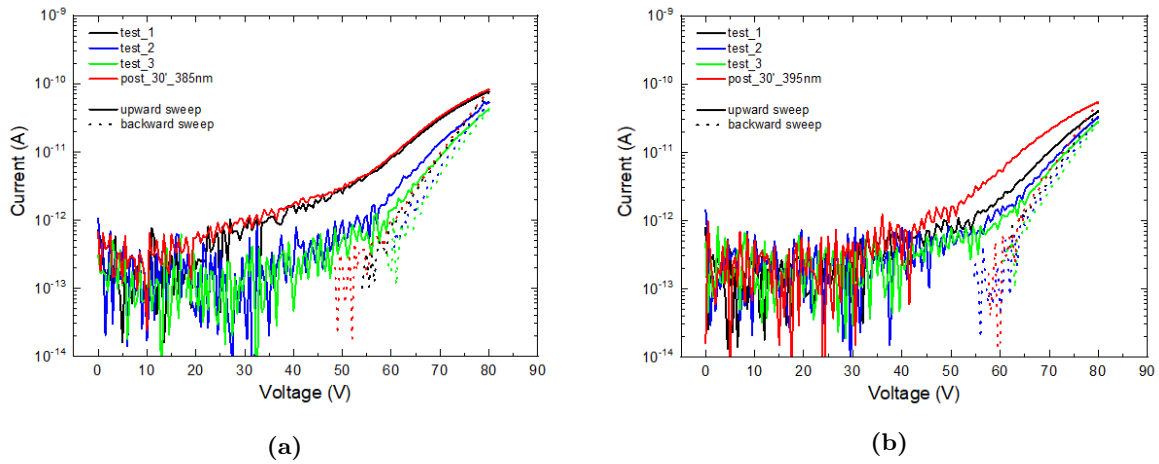


Figura 3.29: (a) I-V pre e post irraggiamento a 385nm. (b) La stessa misura a 395nm.

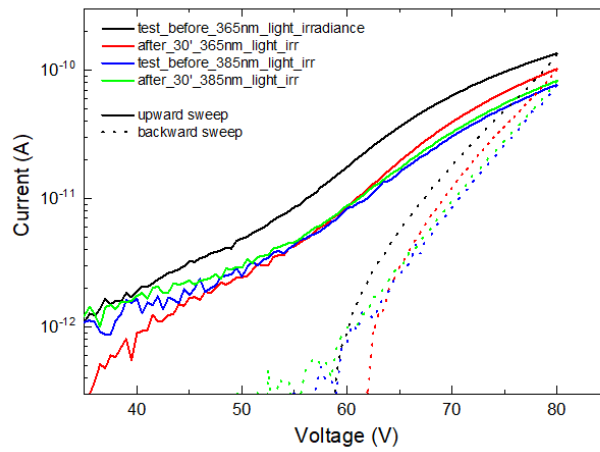


Figura 3.30: Confronto tra recovery presentato dopo irraggiamento a 365nm e a 385nm.

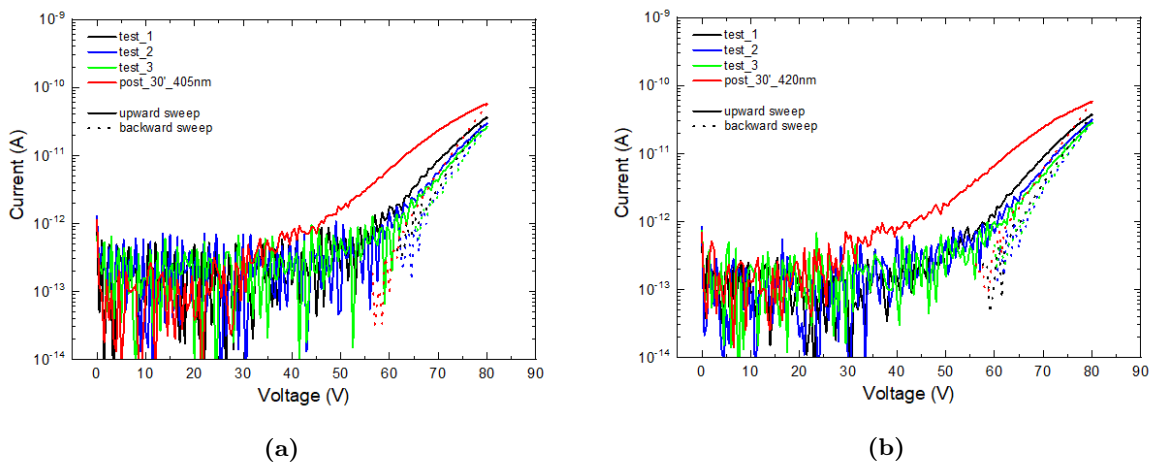


Figura 3.31: I-V pre e post irraggiamento con (a) 450nm (b) 420nm.

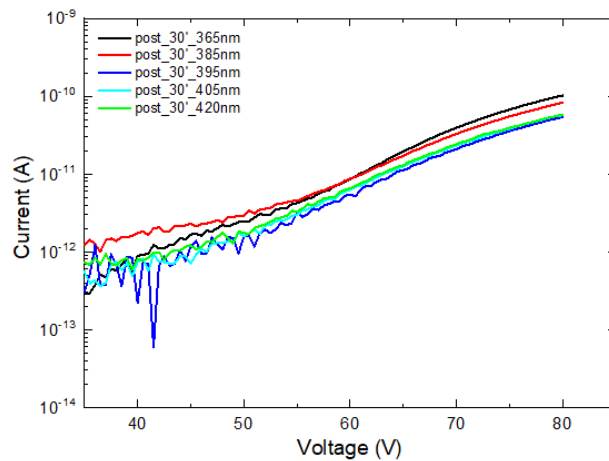


Figura 3.32: Confronto tra i recovery raggiunti mediante irradiazione con i cinque diversi UV LEDs.

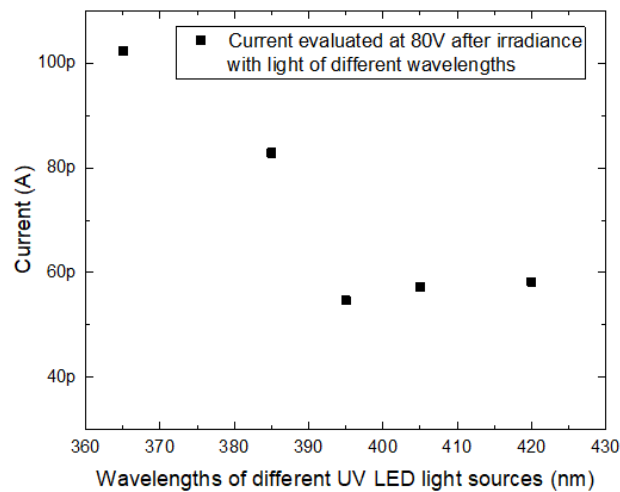


Figura 3.33: Corrente valutata a 80V post irraggiamento con sorgente di luce a diverse lunghezze d'onda.

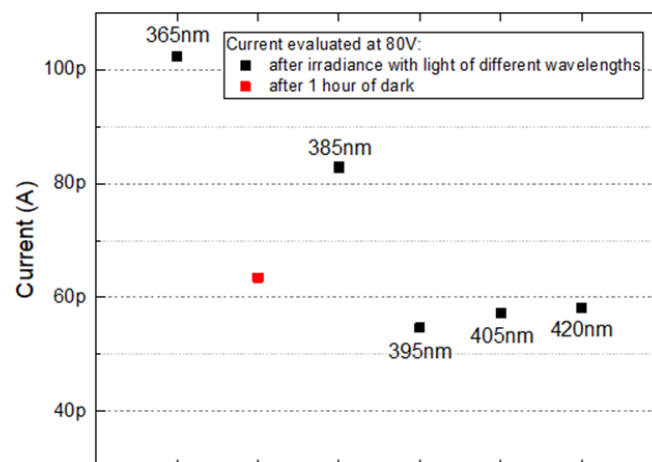


Figura 3.34: Corrente valutata a 80V post irraggiamento con sorgente di luce a diverse lunghezze d'onda. Confronto con la corrente misurata in seguito ad un periodo di riposo al buio di un'ora.

Tabella 3.2: Isteresi di tensione presentata dal dispositivo pre e post irraggiamento mediante sorgente di luce UV a diverse lunghezze d'onda.

Wavelengths of different UV light sources	365 nm	385 nm	395 nm	405 nm	420 nm
	ΔV [V] (evaluated at 10^{-11} A)				
Dark 1	11.22*	8.73	3.83	3.26	3.49
Dark 2	3.52	4.11	2.24	2.39	2.45
Dark 3	2.60	2.62	2.10	2.06	1.40
Post UV light	8.36	9.02	8.69	9.26	9.46

* Fresh DUT

Wavelengths of different UV LED light sources	Current [$\times 10^{-11}$ A] (evaluated at 80V)
365 nm	10.23
385 nm	8.28
395 nm	5.47
405 nm	5.73
420 nm	5.83

Tabella 3.3: Corrente valutata a 80V post irraggiamento con sorgente di luce a diverse lunghezze d'onda.

Wavelengths	447 nm	470 nm	505 nm	530 nm	590 nm	630 nm	700 nm	760 nm
	ΔV [V] (evaluated at 10^{-11} A)							
Dark 1	3.86	7.31	4	3.36	2.77	2.62		
Dark 2	2.61	3.49	2.54	3	2.41	1.96	2.10	1.61
Dark 3	2.57	2.21	1.98	2.14	2.22	1.82	1.34	1.57
Post light	9.12	9.94	10.03	9.95	9	6.63	5.54	5.54

Tabella 3.4: Isteresi di tensione presentata dal dispositivo pre e post irraggiamento mediante sorgente di luce a diverse lunghezze d'onda.

Wavelengths of different LED light sources	Current [$\times 10^{-11}$ A] (evaluated at 80V)
447nm	7.21
470nm	6.93
505nm	6.78
530nm	6.39
590nm	6.03
630nm	4.86
700nm	4.42
760nm	4.18

Tabella 3.5: Corrente valutata a 80V post irraggiamento con sorgente di luce a diverse lunghezze d'onda.

Osservando i dati riportati in tabella 3.5 riscontriamo un decremento significativo della corrente a 80V, il quale corrisponde quindi ad un calo del recovery, in corrispondenza dell'irraggiamento con luce LED a 630nm (rispetto a quello presentato in seguito ad irradiazione a 590nm).

Siamo portati ad ipotizzare, quindi, che vi è un livello energetico nel quale si localizzano stati trappola accettori attivati, che con una luce di lunghezza d'onda >590 nm non vengano più foto-ionizzati, ovvero sia i fotoni di una sorgente di luce di lunghezza d'onda superiore a 590nm non sono più in grado di trasmettere energia sufficiente a scatenare il processo di detrappolamento dei portatori di carica.

Utilizzando semplicemente la legge di Plank

$$E_{fotone} = \frac{hc}{\lambda}$$

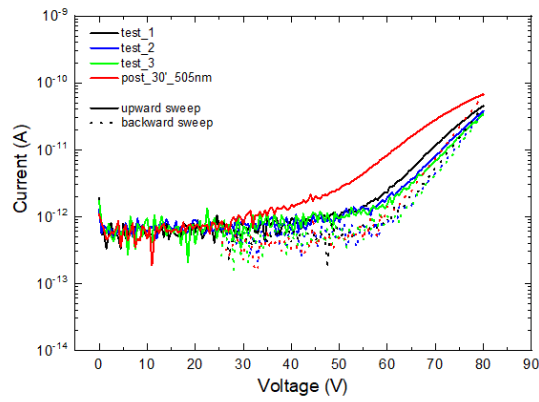
si ricava l'energia dei fotoni costituenti le radiazioni elettromagnetiche (prodotte da diverse sorgenti luminose) relative a diverse lunghezze d'onda

$$590 \text{ nm} \rightarrow 2.10 \text{ eV}$$

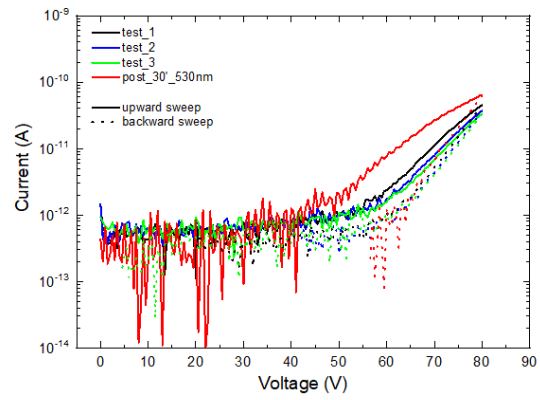
$$590 \text{ nm} \rightarrow 2.10 \text{ eV}$$

Stimiamo quindi che ci sia una distribuzione di trappole accettori ad un livello energetico compreso nell'intervallo $[2.10 \text{ eV} - 1.97 \text{ eV}]$ sotto la banda di conduzione. Un tale ragionamento lo troviamo anche in letteratura, ad esempio in [1].

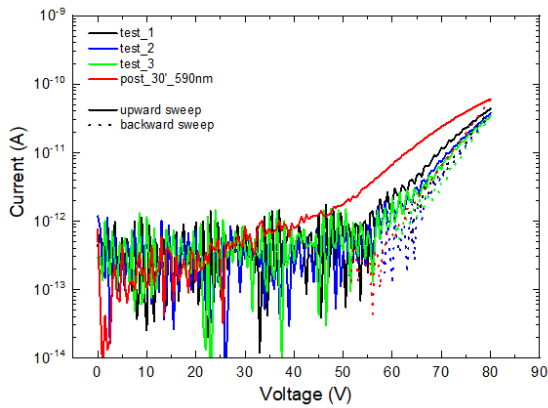
Le trappole che si riscontrano si trovano nel primo o nel secondo strato del transition layer ($\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{N}$ oppure AlN), che potrebbero essere dovute ad impurità incorporate nello strato di AlGaN dovute alla crescita della eterostruttura.



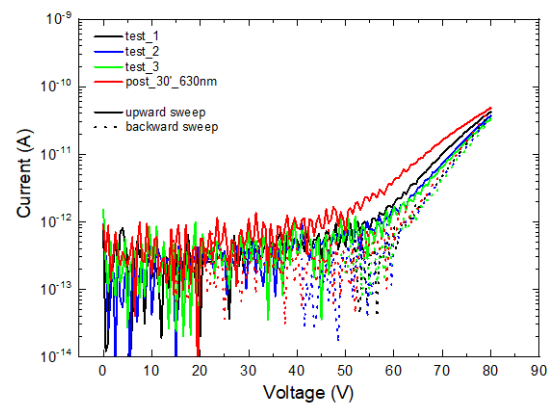
(a)



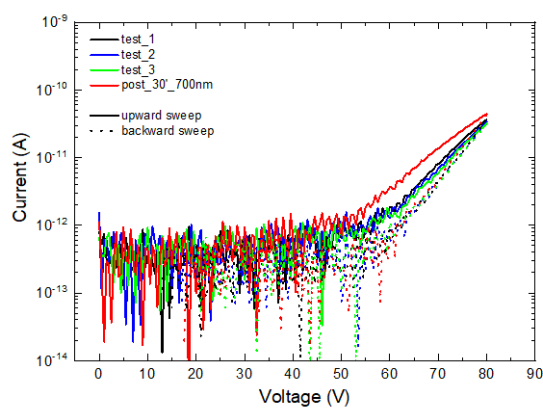
(b)



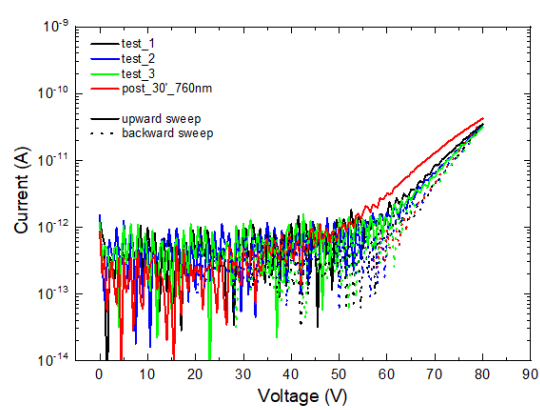
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.35: I-V pre e post irraggiamento a diverse lunghezze d'onda. (a) 505nm (b) 530nm (c) 590nm (d) 630nm (e) 700nm (f) 760nm.

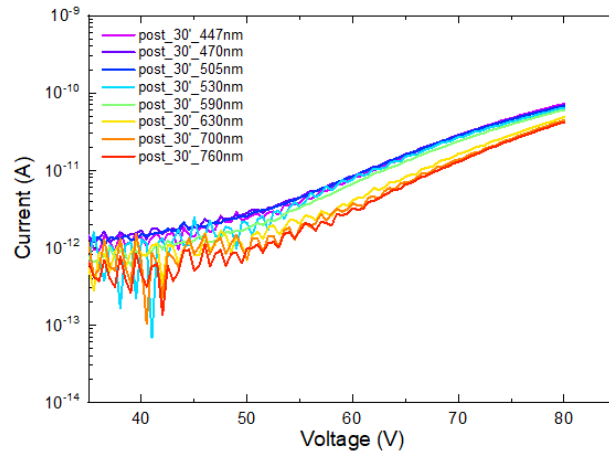


Figura 3.36: Confronto tra i recovery raggiunti mediante irradiazione con i cinque diversi UV LEDs.

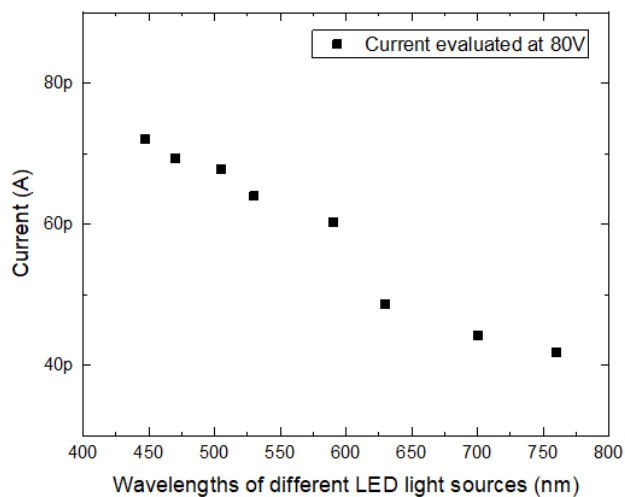


Figura 3.37: Corrente valutata a 80V post irraggiamento con sorgente di luce a diverse lunghezze d'onda.

3.3 Meccanismi di breakdown

Diversi dispositivi per ogni campione sono stati sottoposti ad uno sweep in tensione applicato sul pad ohmico, mentre il substrato è stato collegato a massa. Queste misurazioni sono state effettuate a 30, 100, e a 170°C. La tensione applicata è stata portata da 0V fino alla rottura del dispositivo, in modo tale da osservare sia l'andamento della corrente di perdita che la tensione di guasto in una singola misurazione. Ricordiamo che il campione no.1 consiste solamente in un sottile strato di nitruro di alluminio cresciuto sopra un substrato di silicio drogato p, quest'ultimo da considerarsi quindi conduttivo. A causa del notevole mismatch reticolare tra il nitruro di alluminio e il silicio, lo strato di AlN presenta una difettosità elevata. Ciò comporta una caratteristica tensione-corrente instabile e, quindi, un'elevata variabilità di comportamento device-to-device (vedi figura 3.38). L'andamento della corrente mostra una bassa dipendenza dalla temperatura alla quale si trova il dispositivo, infatti, in precedenza, avevamo osservato come la conduzione attraverso il campione 1 fosse limitata dall'iniezione per effetto tunnel dal substrato allo strato di nucleazione (processo che dipende debolmente dalla variazione di temperatura). Quindi, ciò conferma il fatto che la conduzione di corrente attraverso questo dispositivo dipende principalmente dalla difettosità locale del materiale, ovvero sia è limitata dai difetti presenti localmente all'interfaccia dalla parte del nitruro di alluminio. Data la natura conduttiva del substrato di silicio, possiamo supporre che tutta la tensione applicata cada ai capi dell'AlN layer. In aggiunta, il nitruro di alluminio è considerato un materiale isolante, il che significa che possiamo fare l'approssimazione per la quale il campo elettrico all'interno di esso è uniforme e costante lungo tutta la direzione di crescita dell'AlN. Queste due approssimazioni ci permettono di stimare il campo elettrico medio che causa il breakdown del nucleation layer calcolando il rapporto tra la tensione di rottura e lo spessore dello strato di nucleazione stesso. A 30°C il campo elettrico critico medio dello strato di AlN risulta essere pari a 3.2 MV/cm, per scendere fino a 2.78 MV/cm a 170°C.

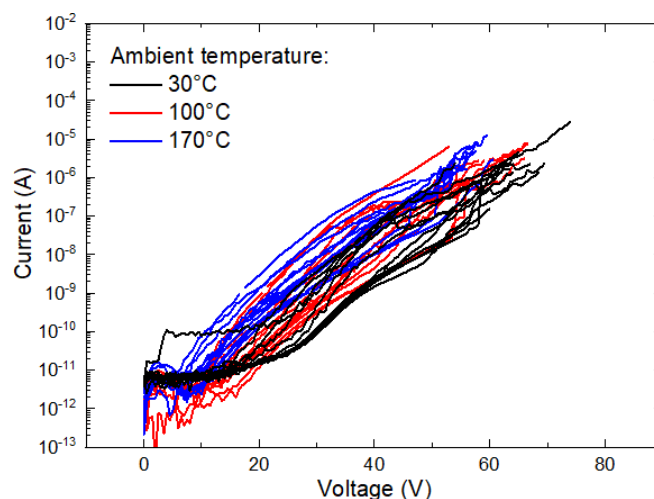


Figura 3.38: Caratteristica tensione-corrente del primo campione a diverse temperature.

Il campione no.2 presenta una struttura più spessa rispetto al campione precedente e, sopra lo strato di AlN, viene cresciuto un primo strato di AlGaIn. Confrontando le caratteristiche

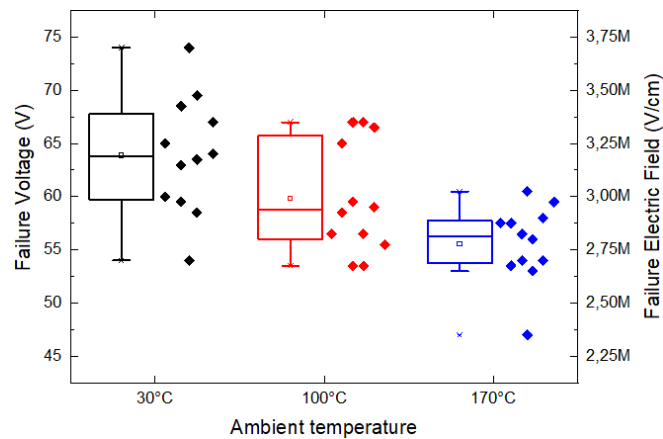


Figura 3.39: Box chart delle tensioni di rottura dei dispositivi misurati del primo campione. L'asse y sulla destra mostra i corrispondenti campi elettrici.

dei dispositivi relativi al secondo campione con quelle presentate dai dispositivi del primo campione, è chiaro il ruolo dello strato di AlGa_N: le curve di corrente del secondo campione risultano molto più stabili, e la variabilità device-to-device è considerabilmente ridotta (vedi figura 3.1). In aggiunta, dato il maggior spessore totale dei livelli epitassiali, la tensione di breakdown dei dispositivi sul campione Al_{0,70}Ga_{0,30}/AlN/Si-sub è molto più alta rispetto alla tensione di guasto presentata dai dispositivi del campione AlN/Si-sub. Nel caso del secondo campione il campo elettrico medio al breakdown è stato calcolato approssimativamente come il rapporto tra la tensione di rottura e lo spessore totale degli strati di AlN e AlGa_N, ed è risultato essere 2,58 MV/cm a 30°C. Questo valore è più basso rispetto a quello calcolato nel caso del primo campione, ciò significa che il campo elettrico non è distribuito uniformemente all'interno dello stack AlN/AlGa_N; ciò può essere dovuto alle diverse costanti dielettriche dei due materiali.

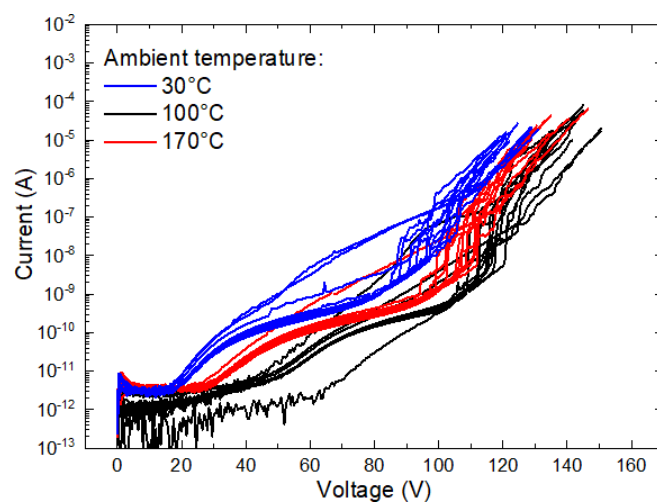


Figura 3.40: Caratteristica tensione-corrente del secondo campione a diverse temperature.

Il terzo campione testato attraverso questo tipo di misurazioni è il numero 4, il quale consiste nello strato di AlN, cresciuto su un substrato di silicio, nell'intero insieme di strati

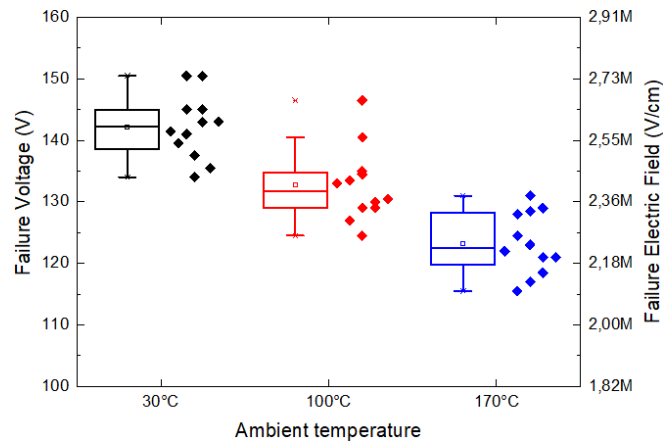


Figura 3.41: Box chart delle tensioni di rottura dei dispositivi misurati del secondo campione. L'asse y sulla destra mostra i corrispondenti campi elettrici.

di AlGa_N, i quali prevengono il propagarsi delle dislocazioni attraverso lo stack epitassiale e, infine, in uno strato di GaN, drogato con carbonio. L'obiettivo di questo ultimo strato drogato C è essenzialmente quello di ridurre la conduttività intrinseca del GaN. Grazie allo spesso stack epitassiale e all'alta qualità dello strato C-GaN, la tensione di breakdown viene incrementata considerevolmente (oltre i 700V); inoltre, si osserva una variabilità notevolmente bassa tra i dispositivi testati (vedi figura 3.42). La temperatura di lavoro ha un impatto evidente sulla corrente che attraversa la struttura, portando quest'ultima ad essere visibilmente più alta a temperature più elevate. Possiamo pensare che questo sia dovuto ad un incremento della generazione termica di cariche libere all'interno dei semiconduttori.

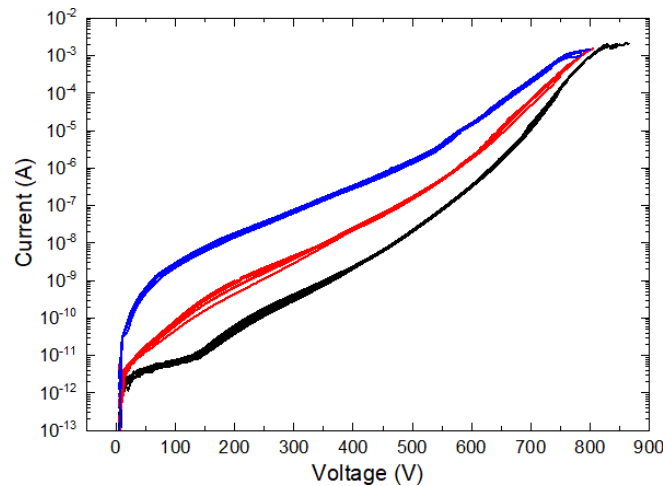


Figura 3.42: Caratteristica tensione-corrente del campione 4 a diverse temperature.

La tensione di BD mostra un andamento lineare al variare della temperatura nel caso dei campioni 1 e 2, mentre nel caso del campione 4 questo non si verifica proprio. Inoltre, l'AlN presenta una elevata variabilità device-to-device. Procedendo con il processo di crescita epitassiale si riduce la variabilità presentata tra i diversi dispositivi, vedi nel caso del campione 2, dove viene aggiunto il primo strato di AlGa_N. Tale campione presenta una ridotta variabilità

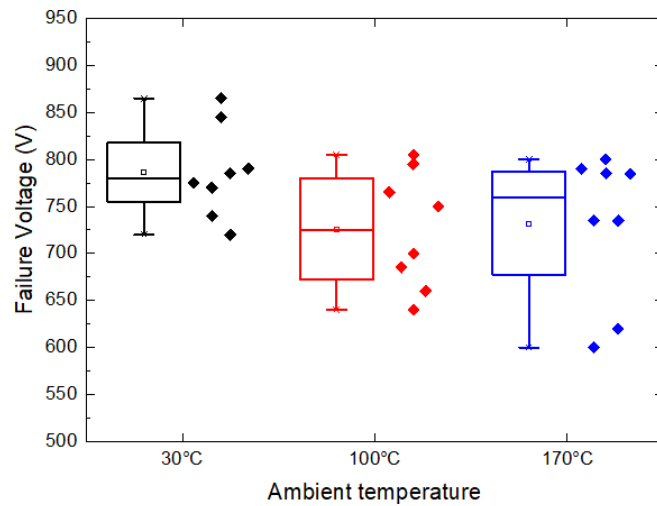


Figura 3.43: Box chart delle tensioni di rottura dei dispositivi misurati del campione 4. L'asse y sulla destra mostra i corrispondenti campi elettrici.

grazie alla bassa densità di difetti dello strato di AlGaN, di qualità sicuramente migliore rispetto allo strato precedente. Proseguendo con la crescita si ottiene una ottima riproducibilità del comportamento I-V tra i dispositivi del campione 4. Questo risultato è dovuto alla possibilità di controllo della concentrazione di carbonio in fase di crescita. Abbiamo dimostrato, quindi, che il fatto di avere una certa variabilità nelle misure effettuate su diversi dispositivi di uno stesso campione è legato alla difettosità del materiale.

3.4 Meccanismi di breakdown: constant voltage stress

Questa sezione si focalizza sui meccanismi di guasto del campione in AlN cresciuto su un substrato di Silicio di tipo p. Le caratteristiche della corrente di leakage a diverse temperature viste in precedenza mostrano un comportamento instabile della corrente che attraversa la struttura ai cui capi è applicato uno sweep in tensione. Lo studio della statistica di guasto di questo campione ci permette di capire meglio se i difetti giocano un ruolo chiave nel breakdown del dispositivo. Un gruppo di stress in tensione costante sono forniti polarizzando a 50V il contatto ohmico all'estremità superiore dello strato di AlN e tenendo il substrato in silicio a massa. Grazie all'elevata conduttività elettrica del substrato in silicio drogato p, possiamo pensare sia ragionevole fare l'approssimazione che tutta la tensione applicata cada sullo strato di AlN, permettendoci così di studiare la statistica di guasto relativa al nucleation layer in nitruro di alluminio.

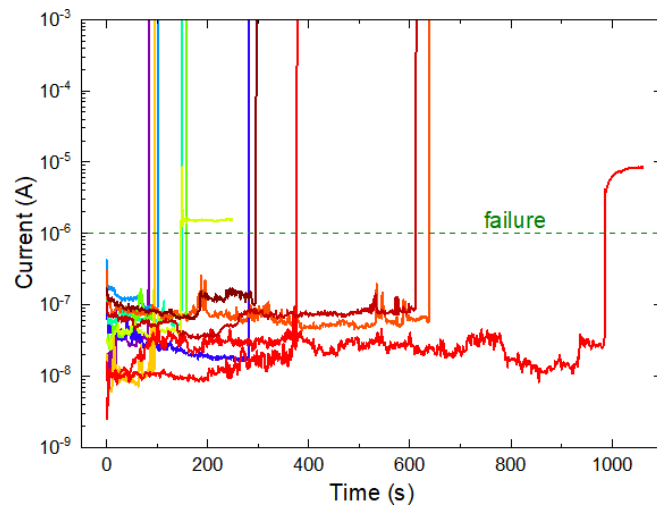


Figura 3.44: Comportamento in corrente del campione 1 sotto stress di tensione costante a 50 V.

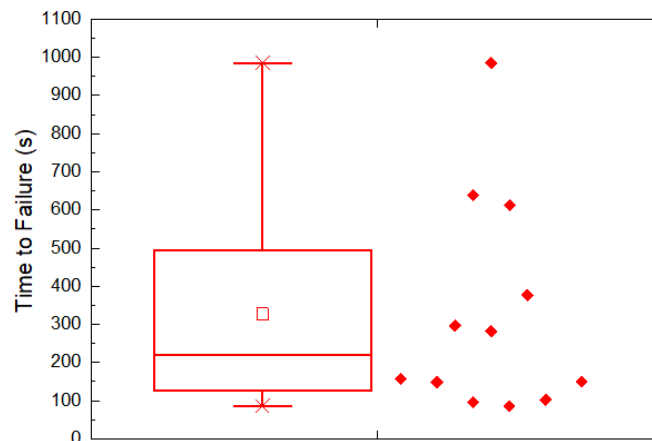


Figura 3.45: Box chart del tempo di guasto dei dispositivi testati del campione 1.

In figura 3.44 si può osservare il comportamento rumoroso della corrente attraverso lo strato di AlN al passare del tempo; tale rumorosità presentata dalla corrente di leakage può essere

attribuita all'elevata difettosità del materiale, dalla quale consegue una dinamica formazione-interruzione dei percorsi di perdita. Appena un gruppo di difetti si allinea, viene a formarsi un percorso conduttivo tra il contatto ohmico e il substrato, il quale porta ad un breakdown distruttivo del dispositivo. Graficando il tempo di guasto di un gruppo di 12 dispositivi del campione A (AlN/Si) su un grafico di Weibull (vedi figura 3.46) si può notare che i punti sono allineati in modo abbastanza preciso. Ciò significa che il guasto per questo campione segue la distribuzione di Weibull. Il valore del parametro β della distribuzione, estratto con un livello di confidenza del 99%, è pari a 1.05, il quale significa che i guasti sono causati da un processo usurante che degrada i dispositivi. Il parametro α che rappresenta il tempo alla quale si prevede che il 63.2% dei dispositivi sia guasto, è di 189 secondi per le condizioni di stress adottate.

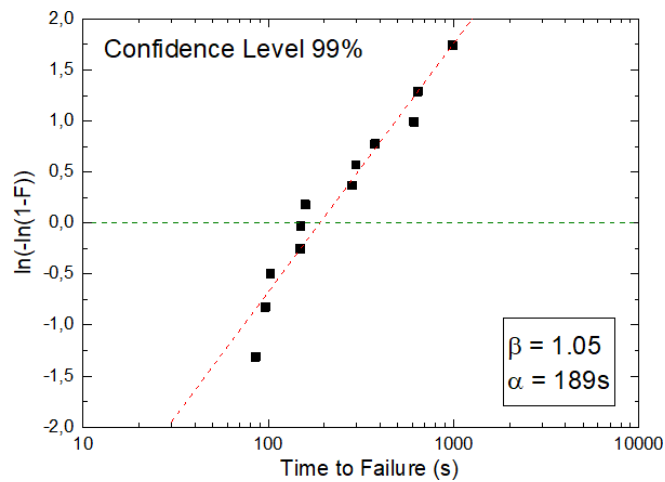


Figura 3.46: Weibull plot della rottura dei dispositivi sottoposti a stress di tensione costante a 50 V.

Focalizzandoci, quindi, sul campione A, abbiamo mostrato che lo strato di nucleazione di nitruro di alluminio, cresciuto sopra il substrato di silicio, subisce un processo di usura quando viene sottoposto ad uno stress a tensione costante, ovvero segue una distribuzione di Weibull per quanto riguarda il tempo al guasto presentato, il quale ci suggerisce che il meccanismo di rottura dello strato di AlN stesso è un processo percolativo.[2]

Capitolo 4

Conclusioni

In questo elaborato abbiamo studiato il comportamento elettrico di diverse strutture ottenute attraverso lo stopping di un processo standard di crescita epitassiale basata sulla tecnologia GaN-on-Si, in particolare abbiamo effettuato un'analisi dei meccanismi di conduzione e dei processi di breakdown che avvengono all'interno di tali strutture.

Abbiamo dimostrato che, sia lo spessore che la composizione dei materiali che compongono lo stack epitassiale, sono elementi fondamentali per raggiungere una migliore affidabilità del dispositivo finale, o una maggior efficienza delle soluzioni circuitali nelle quali i dispositivi interessati vengono posti. Ad esempio, abbiamo visto che un incremento dello spessore della struttura, implicato dall'avanzamento del processo di crescita seguito, porta ad un aumento della tensione di breakdown del dispositivo. Migliorando la qualità del materiale, infatti, si limitano la propagazione di difetti e dislocazioni all'interno dello stesso.

Il nostro scopo è stato quello di analizzare, quindi, la robustezza verticale e le perdite di corrente che interessano strutture che stanno alla base di possibili HEMT impiegati in applicazioni di potenza, fondamentalmente convertitori DC DC switching e inverter.

Riassumiamo brevemente di seguito le principali osservazioni alle quali siamo arrivati.

La difettosità del nucleation layer in AlN è la principale causa delle perdite attraverso la giunzione AlN/Si, ed è pure la causa dell'elevata variabilità device-to-device delle caratteristiche I-V (corrente verticale). Il fatto di presentare una certa variabilità tra misure effettuate su diversi dispositivi di uno stesso campione è legato infatti alla difettosità del materiale del campione stesso.

Un set di stress a tensione costante sul campione 1 (AlN/Si) ci hanno fatto capire che lo strato di AlN presenta un breakdown tempo-dipendente, con le relative rotture che seguono una distribuzione di Weibull, presentando un fattore di forma più grande di 1, in linea con il modello percolativo di Degraeve.

Il primo layer di AlGaN cresciuto sopra l'AlN, oltre che aumentare la tensione di breakdown dell'intera struttura, fa in modo che la corrente di perdita sia più stabile e uniforme attraverso l'area del campione. Uno spesso stack multi-layer che allevia lo stress tensile dovuto alla crescita GaN-on-Si, e un buffer C:GaN comportano un incremento notevole della tensione di

breakdown, fino a valori superiori ai 750 V a 170°C; garantiscono, inoltre, una incredibilmente bassa variabilità di comportamento tra dispositivi.

Per i campioni 1 (AlN/Si) e 2 (Al_{0.70}Ga_{0.30}N/AlN/Si) abbiamo osservato un andamento lineare della tensione di breakdown al variare della temperatura.

Per il campione 2 (Al_{0.70}Ga_{0.30}N/AlN/Si) abbiamo stimato che vi sia una distribuzione energetica di trappole accettori ad un livello compreso nell'intervallo (2.10 eV, 1.97 eV] sotto la banda di conduzione. Le prove di recovery effettuate sul secondo campione (Al_{0.70}Ga_{0.30}N/AlN/Si) hanno confermato il fatto che le variazioni nelle caratteristiche della corrente a cui si assiste sono dovute ad intrappolamento di carica negativa.

Infine, è stato dimostrato per la prima volta che il campo di rottura dell'AlN NL cresciuto su un substrato di silicio drogato mediante boro è uguale a 3.2 MV/cm. Dall'analisi svolta si osserva che lo strato GaN drogato con carbonio gioca un ruolo fondamentale per quanto riguarda la robustezza verticale del dispositivo finale, ovvero sia per un HEMT di potenza. Lo step di crescita epitassiale che porta alla sua deposizione sullo stack comporta un incremento radicale del campo elettrico di breakdown. Questo si riflette sulla possibilità di lavorare con tensioni più elevate, permettendo così un aumento essenziale della potenza gestibile dal dispositivo o, in egual modo, la creazione di un dispositivo più piccolo a parità di potenza.

Bibliografia

- [1] G. Meneghesso *et al.*, “Breakdown mechanisms in AlGa_N/Ga_N HEMTs: An overview,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 53, Jan 2014.
- [2] R. Degraeve *et al.*, “New insights in the relation between electron trap generation and the statistical properties of oxide breakdown,” *IEEE Tran. on Electron Devices*, vol. 45, Apr 1998.
- [3] L. Sayadi *et al.*, “The role of silicon substrate on the leakage current through Ga_N-on-Si epitaxial layers,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, pp. 51–58, Jan 2018.
- [4] M. Knetzger *et al.*, “Correlation of carbon doping variations with the vertical breakdown of Ga_N-on-Si for power electronics,” *Microelectronics Reliability*, vol. 66, pp. 16–21, Nov 2016.
- [5] C. Zhou, Q. Jiang, S. Huang, and K. J. Chen, “Vertical leakage/breakdown mechanisms in AlGa_N/Ga_N-on-Si structures,” in *Proc. ISPSD*, Jun 2012.
- [6] G. Meneghesso *et al.*, “High voltage trapping effects in Ga_N-based metal-insulator-semiconductor transistors,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 55, no. 1S, 2016.
- [7] X. Li, M. V. Hove, M. Zhao, B. Bakeroot, S. You, G. Groeseneken, and S. Decoutere, “Investigation on carrier transport through Al_N nucleation layer from differently doped Si(111) substrates,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, pp. 1721–1727, May 2018.
- [8] I. Rowena, S. L. Selvaraj, and T. Egawa, “Buffer thickness contribution to suppress vertical leakage current with high breakdown field (2.3MV/cm) for Ga_N on Si,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 32, pp. 1534–1536, Nov 2011.
- [9] J. Sun *et al.*, “Substantiation of buried two dimensional hole gas (2DHG) existence in Ga_N-on-Si epitaxial heterostructure,” *Applied Physics Letters*, vol. 110, Apr 2017.