

UNIVERSITÀ DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

**Studio dei fenomeni di degradazione di dispositivi
HEMT su GaN sottoposti a stress in corrente**

Relatore: Prof. Gaudenzio Meneghesso

Correlatore: Prof. Enrico Zanoni

Laureando: Sebastiano Corraini

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Anno Accademico 2009/2010

Indice

Sommario	5
Introduzione.....	7
1 Nitruro di Gallio	9
1.1 Struttura cristallina	9
1.2 Proprietà elettriche e diagramma a bande.....	10
1.3 Substrati	13
1.4 Tecnologie di produzione	15
1.5 Contatti ohmici	18
2 HEMT	21
2.1 Eterostruttura	21
2.2 Eterostruttura AlGaN/GaN degli HEMT.....	21
2.3 Fenomeni di intrappolamento di carica	25
2.3.1 Collasso di corrente	26
2.3.2 Dispersione in frequenza	28
2.3.3 Soluzioni per ridurre i fenomeni legati alle trappole.....	30
2.4 Fenomeni di degrado	32
2.4.1 Stabilità dei contatti Schottky e ohmico	32
2.4.2 Elettroni caldi	33
2.4.3 Effetto piezoelettrico inverso.....	35
3 Wafer e setup di misura.....	37
3.1 Dispositivi analizzati	37
3.1.1 Wafer Selex	37
3.1.2 Tipi di campioni studiati.....	38
3.2 Caratterizzazione DC.....	40
3.3 Misure dinamiche	41

3.3.1	Sistema di misura adottato	42
3.4	Misure di elettroluminescenza	43
4	Caratterizzazione statica e dinamica	45
4.1	Misure DC.....	45
4.2	Misure dinamiche su dispositivi 2x100 μ m	49
5	Misure di affidabilità	53
5.1	Step Stress in tensione.....	53
5.2	Step Stress in corrente.....	61
Conclusioni.....		105
Elenco delle figure.....		107
Elenco delle tabelle.....		111
Bibliografia.....		113

Sommario

In questo lavoro di tesi è stato studiato l'effetto di degradazione di dispositivi HEMT su Nitruro di Gallio per applicazioni di potenza nel campo delle microonde (da 300 MHz a 300 GHz), in particolare analizzando l'effetto di una polarizzazione a corrente costante. La valutazione di degrado è stata realizzata mediante la caratterizzazione in DC, misure dinamiche e di elettroluminescenza.

La procedura di invecchiamento dei dispositivi utilizzata è stata effettuata portando i diodi gate-source e gate-drain in condizioni di polarizzazione inversa sempre più gravose, tramite l'imposizione di una corrente inversa applicata al terminale di gate del dispositivo sotto test. Attraverso la caratterizzazione DC è stato possibile studiare l'andamento dei parametri più importanti, quali corrente di drain, corrente di leakage del gate, transconduttanza e tensione di soglia nel corso dello stress. Con le misure di emissione, invece, si è valutato in particolare modo la comparsa di difetti nella regione attiva del transistor polarizzato in condizioni di dispositivo spento. Infine si è cercata una correlazione tra gli andamenti della tensione di stress indotta al gate (tramite corrente di stress) e l'emissione di fotoni del dispositivo durante lo stress.

Introduzione

Con il continuo sviluppo dei sistemi di comunicazione e di accesso a reti senza fili a larga banda, i transistor che operano nelle microonde (da 300 MHz a 300 GHz) stanno assumendo un ruolo sempre più importante in molte attività. Il crescente sviluppo e diffusione di sistemi di comunicazione cellulare e via satellite oltre che la sempre più grande richiesta di accesso ad internet e TV, sta giustificando grandi investimenti nello sviluppo di dispositivi a microonde ad elevate prestazioni basati su Si/SiGe, GaAs, SiC e GaN.

La richiesta di elevate potenze e frequenze operative ha spinto a realizzare dispositivi su semiconduttori che presentino alte tensioni di breakdown ed elevata mobilità degli elettroni. Da questo punto di vista sono preferibili materiali con bandgap elevato, come GaN e SiC; i due semiconduttori hanno tensione di rottura e velocità di saturazione degli elettroni simili, però il GaN è da preferirsi in quanto può realizzare eterogiunzioni. Quindi con il Nitrato di Gallio si possono fabbricare HEMT (basati sull'eterostruttura AlGaN/GaN), mentre il SiC può essere utilizzato solo per ottenere MESFET (transistor a modulazione di canale); gli HEMT hanno il vantaggio di presentare un'alta concentrazione di portatori ed un'elevata mobilità elettronica, aspetti principalmente dovuti all'assenza di scattering coulombiano. La combinazione di queste due caratteristiche si traduce in un'elevata densità di corrente e una bassa resistenza di canale, fattori importantissimi in applicazioni ad alta frequenza e di potenza.

Per quanto riguarda gli amplificatori, gli HEMT su GaN presentano numerosi vantaggi rispetto ad altre tecnologie esistenti (per esempio HEMT su GaAs). Infatti l'alta densità di potenza di uscita permette di fabbricare dispositivi più piccoli, facilitandone la collocazione e diminuendo le perdite. Inoltre la possibilità di operare a tensioni elevate, grazie all'elevato campo elettrico di breakdown, non solo riduce la necessità di convertitori di tensione, ma potenzialmente consente anche di migliorare notevolmente l'efficienza. Infine l'ampio bandgap consente di operare anche a temperature elevate e gli HEMT mostrano migliori performance nei confronti del rumore rispetto ai MESFET. Tutte queste caratteristiche fanno dei GaN HEMT un candidato molto promettente per applicazioni di potenza a microonde.

Tuttavia la tecnologia sul Nitruro di Gallio è ancora immatura, rispetto per esempio al Silicio, e ancora molti progressi devono essere fatti, soprattutto nel campo dell'affidabilità.

In questa tesi sono stati studiati AlGa_N/Ga_N HEMT provenienti da wafer realizzati da "Selex – Sistemi Integrati". Di seguito viene riportata la struttura della tesi:

- *Capitolo 1* : vengono presentate le proprietà chimiche, fisiche ed elettriche del Nitruro di Gallio, i substrati e le tecniche di crescita.
- *Capitolo 2* : viene fatta una breve trattazione storica sugli HEMT, per poi passare ad analizzare l'eterogiunzione AlGa_N/Ga_N e il principio di funzionamento degli HEMT, finendo con gli effetti che ne limitano le prestazioni.
- *Capitolo 3* : vengono descritti i vari dispositivi del wafer a disposizione per i test. Inoltre sono presentati tutti i setup di misura e le grandezze prese in considerazione.
- *Capitolo 4* : vengono descritte le più importanti grandezze misurate sui dispositivi in condizioni statiche e dinamiche.
- *Capitolo 5* : viene presentato lo studio dell'affidabilità di alcuni dispositivi HEMT e dispositivi TLM sottoposti a stress in corrente costante.

Capitolo 1

Nitruro di Gallio

1.1 Struttura cristallina

Il GaN è un composto binario la cui molecola è formata da un atomo di gallio (III gruppo, $Z = 31$) e uno di azoto (V gruppo, $Z = 7$). A temperatura ambiente si presenta in fase solida con struttura sia amorfa che cristallina. La struttura cristallina può avere forma wurtzite o zincoblenda, quest'ultima risulta più rara perchè, essendo metastabile, tende a passare alla forma stabile di wurtzite. Il GaN è l'unico a cristallizzare prevalentemente nella forma wurtzite, nonostante il fenomeno del polimorfismo sia caratteristica comune dei nitruri del III-V gruppo. La cella elementare nella forma wurtzite (Figura 1.1(a)) è a simmetria esagonale dove ogni atomo di azoto è legato a quattro atomi di gallio disposti secondo i vertici di un tetraedro. Questa struttura può essere vista come la compenetrazione di due reticoli esagonali, ognuno formato da due elementi distinti. Si ottiene quindi, come detto, una cella esagonale al cui interno si distinguono piani formati dallo stesso elemento. I coefficienti reticolari sono $a = b \neq c$ e $\alpha = \beta = 90^\circ$ e $\gamma = 120^\circ$. La cella nella forma zincoblenda (Figura 1.1(b)) invece ha una struttura cubica a facce centrate degli atomi di azoto, a ciascuno dei quali sono legati quattro atomi di gallio, disposti a tetraedro. In questo caso la struttura reticolare può essere pensata come compenetrazione di due reticoli cubici. La zincoblenda presenta costanti reticolari uguali: $a = b = c$ e $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Per quanto riguarda i legami atomici essi sono di natura ionica con energia molto elevata (2.3 eV). Questo fa sì che il movimento di dislocazione e la formazione di difetti all'interno del reticolo siano molto ridotti, limitando così la principale causa di degradazione nei semiconduttori del gruppo III-V sottoposti a correnti elevate. Ne deriva una maggior stabilità che rende il nitruro di gallio preferibile nelle applicazioni di potenza.

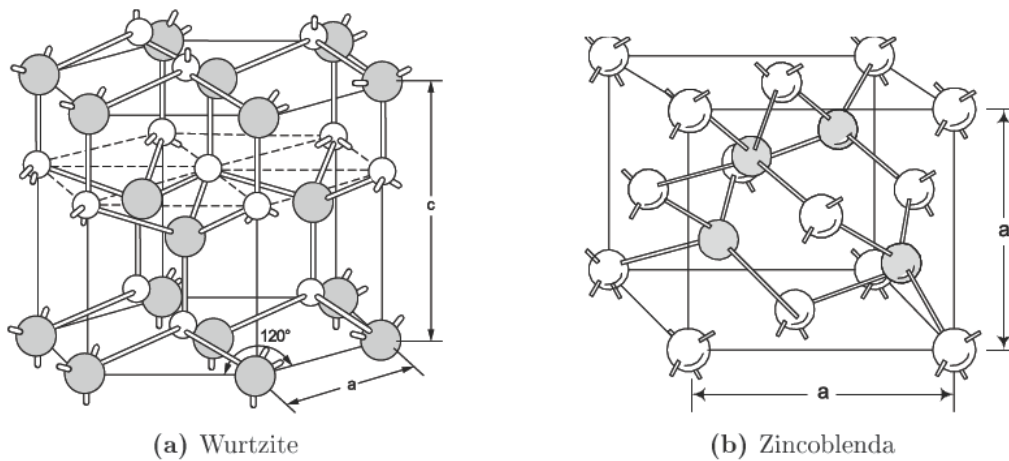


Figura 1.1: Struttura reticolare

1.2 Proprietà elettriche e diagramma a bande

Rispetto ad altri semiconduttori composti il GaN presenta numerosi vantaggi, di cui i più significativi sono le alte costanti piezoelettriche, l'elevata mobilità elettronica e la possibilità di raggiungere forti campi di breakdown. L'effetto piezoelettrico (generato dal forte mismatch reticolare tra substrato, GaN e le varie leghe che costituiscono le eterostrutture) risulta tre volte più elevato rispetto al GaAs. Ciò porta alla presenza di carica elettrica indotta e ad una polarizzazione; questa polarizzazione piezoelettrica insieme a quella spontanea dà origine a un gas elettronico bidimensionale (2DEG), sul quale si basano i dispositivi HEMT. I portatori risultano così confinati in un canale lontano dalle impurezze che li hanno generati e quindi in una zona dove la mobilità è paragonabile a quella del GaN intrinseco. Infine è possibile osservare che il GaN presenta un campo di breakdown di 3 MV/cm contro gli appena 0.4 MV/cm del GaAs. Nella Tabella 1.1 sono messe a confronto alcune proprietà del GaN e di altri semiconduttori.

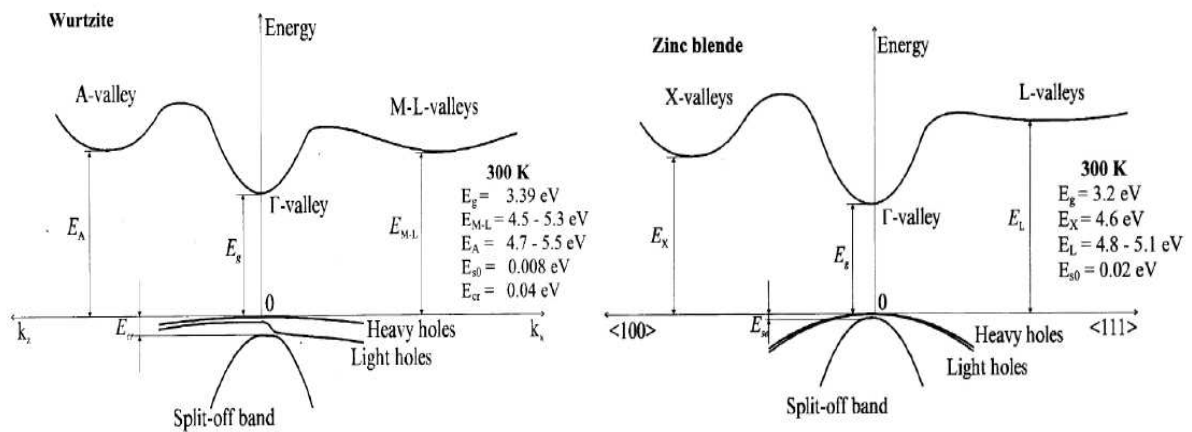
	Si	GaAs	InP	SiC	GaN
Bandgap [eV]	1.1	1.42	1.35	3.26	3.49
Mobilità elettronica (a T = 300K) [cm ² /V · s]	1500	8500	5400	700	1000÷2000
Velocità di saturazione [10 ⁷ cm/s]	1	1.3	1	2	1.3
Campo di Breakdown [MV/cm ²]	0.3	0.4	0.5	3	3
Conducibilità termica [W/cm · K]	1.5	0.5	0.7	4.5	>1.5
Costante dielettrica relativa [ε _r]	11.8	12.8	12.5	10	9

Tabella 1.1: Proprietà elettriche di alcuni semiconduttori [1].

Il nitrato di gallio è un semiconduttore ad energy gap diretto sia nella forma di wurtzite sia di zinoblenda, questo significa che si hanno un minimo di energia della banda di conduzione e un massimo della banda di valenza in corrispondenza dello stesso valore di quantità di moto k (valle Γ in Figura 1.2). Quindi nei semiconduttori a gap diretto la transizione di un elettrone tra la banda di conduzione e la banda di valenza comporta solo uno scambio di energia e non di quantità di moto. Il diagramma a bande della struttura wurtzite presenta la degenerazione della banda di valenza in tre livelli (A, B e C) a causa del forte campo elettrico indotto dalla struttura cristallina.

Inoltre per il GaN non può essere utilizzata l'approssimazione di massa efficace visto l'andamento fortemente non parabolico delle bande, complicando la stima dei livelli delle stesse.

La transizione fondamentale è in ogni caso quella tra il massimo della banda di valenza e il minimo di quella di conduzione.



(a) Wurtzite energy band diagram. (b) Zincblende energy band diagram.

Figura 1.2: Struttura a bande.

Nella Figura 1.3 è illustrato come l'andamento della velocità di deriva degli elettroni nel GaN inizialmente aumenta con il campo elettrico, raggiunge un massimo di $3 \cdot 10^7$ cm/s per poi calare. Il valore di campo elettrico al quale è raggiunto il massimo è diverso per la forma di wurtzite e zinoblenda. L'andamento descritto è dovuto al fatto che gli elettroni possono acquistare, per elevati valori di campo elettrico, energia sufficiente da passare alla valle superiore della banda di conduzione aumentando di conseguenza la loro massa efficace e risultando quindi più lenti. Infine nei due grafici di Figura 1.4 e 1.5 è mostrata la dipendenza della mobilità e della velocità di deriva dalla temperatura per il GaN drogato con $N_d = 10^{17}$ cm⁻³.

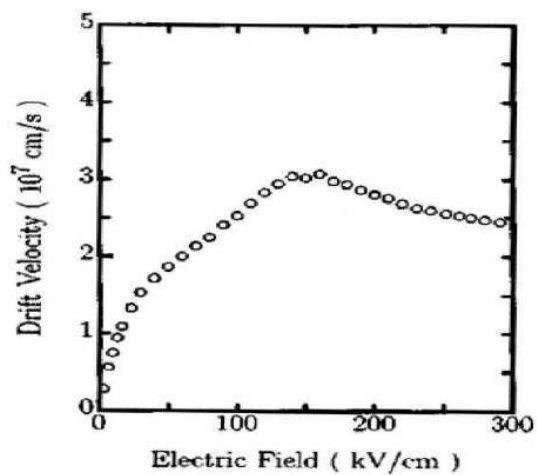


Figura 1.3: Velocità di deriva in funzione del campo elettrico [2].

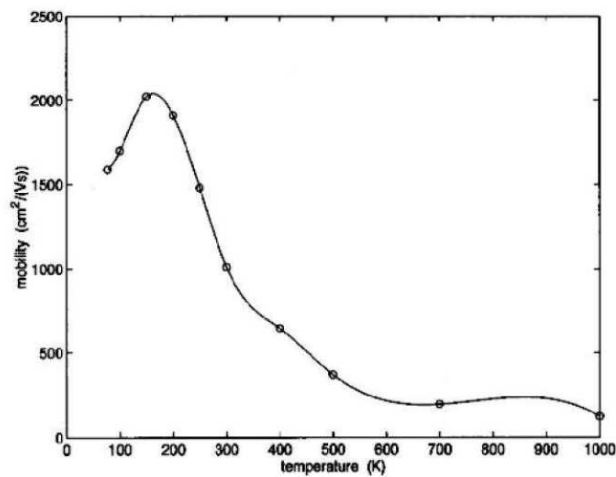


Figura 1.4: Mobilità in funzione della temperatura [3].

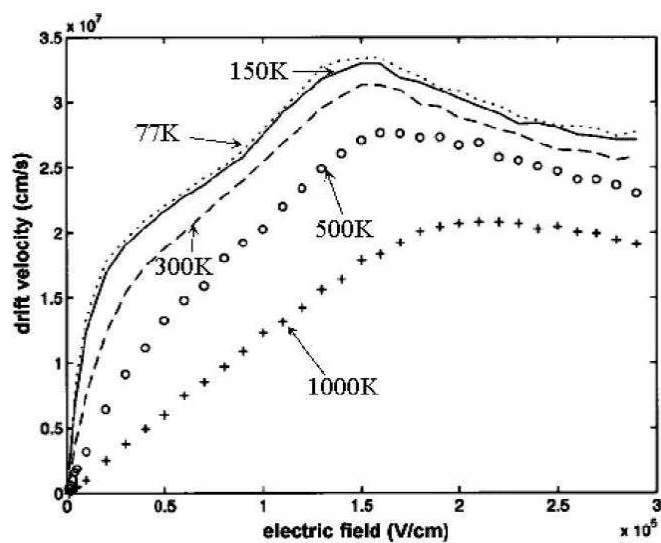


Figura 1.5: Velocità di deriva in funzione del campo elettrico per diverse temperature [3].

1.3 Substrati

Il GaN viene fatto crescere mediante un processo eteroepitassiale, cioè su un substrato di materiale diverso dal nitruro di gallio stesso. Per evitare, in fase di crescita (che avviene in condizioni di elevate temperature e pressioni) la formazione di dislocazioni, è necessario trovare per il substrato un materiale con costanti reticolari e coefficienti di espansione termica molto simili a quelli del GaN. Infatti questi difetti del reticolo variano in maniera rilevante le caratteristiche dei dispositivi andando a ridurre la mobilità dei portatori, aumentando il rumore e le perdite di gate e causando anche un breackdown prematuro. L'utilizzo per la crescita di un substrato di GaN (omoepitassia) introdurrebbe notevoli vantaggi, ma la sua realizzazione presenta allo stato attuale problemi insormontabili. Attualmente i substrati maggiormente utilizzati sono lo zaffiro e il carburo di silicio, anche se sono stati fatti tentativi di crescita anche su substrati di silicio, ossido di zinco, ossido di magnesio e composti come SopSiC (Si su polySiC) e SiCopSiC (SiC su polySiC).

Zaffiro (Al_2O_3). Lo Zaffiro è stato il primo materiale ad essere utilizzato come substrato per la crescita del nitruro di gallio [4], le caratteristiche che hanno portato a questa scelta sono: la struttura cristallina a simmetria esagonale come quella del GaN, buona stabilità alle temperature e pressioni richieste, e facilità nel trattamento di pulizia superficiale prima della crescita. Inoltre presenta un costo di produzione ridotto, anche per l'alta disponibilità, e la tecnologia per ottenerlo è ormai piuttosto affinata.

Il notevole mismatch reticolare (come illustrato in Figura 1.6) e termico tra Zaffiro e GaN-wurtzite porta però alla formazione di numerose dislocazioni e vacanze nella struttura cristallina del GaN cresciuto. Per limitare questa problematica viene utilizzato uno strato buffer (*nucleation layer*) tra substrato e GaN per rendere più graduale il cambiamento di costanti reticolari. A questo scopo si sono ottenuti buoni risultati realizzando lo strato buffer in nitruro di alluminio (AlN); la crescita di GaN su AlN provoca l'aumento di un fattore dieci della mobilità, ma la riduzione di due ordini di grandezza della concentrazione di elettroni liberi nel GaN.

Più recentemente sono stati ottenuti risultati ancora migliori facendo crescere GaN su uno strato buffer di GaN.

Lo zaffiro è inoltre un isolante elettrico ed è trasparente alle radiazioni luminose dall'ultravioletto alle microonde.

Carburo di Silicio (SiC). Il carburo di silicio è un altro materiale commercialmente utilizzato per la crescita del GaN [5]. Presenta alcuni vantaggi rispetto allo zaffiro, soprattutto legati al minore mismatch reticolare e termico con il GaN. Ciò porta ad ottenere un numero inferiore di dislocazioni e difetti reticolari nel GaN cresciuto. Inoltre il SiC è un buon conduttore sia termico che elettrico; in particolare l'elevata conducibilità termica permette di abbassare le perdite ohmiche, rendendolo preferibile per applicazioni di potenza, dove la dissipazione di calore è un aspetto fondamentale. Lo svantaggio principale del Carburo di Silicio è l'alto costo di produzione.

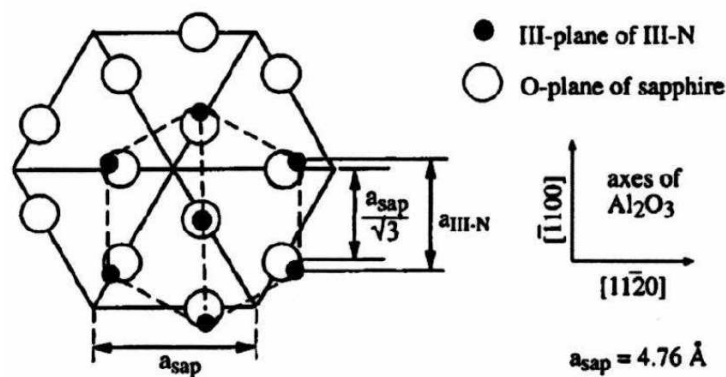


Figura 1.6: Confronto tra celle elementari di zaffiro e GaN.

Nella tabella 1.2 sono messe a confronto le caratteristiche principali dei due substrati appena descritti.

Parametri	Zaffiro (Al_2O_3)	Carburo di Silicio (6H-SiC)
Simmetria	esagonale	esagonale
Costante reticolare a	4.758 Å	3.08 Å
Costante reticolare b	12.99 Å	15.12 Å
Densità	3.98 g/mm ³	3.21 g/mm ³
Punto di fusione	2050 °C	2850 °C
Calore specifico a 20 °C	0.16 cal/g	0.16 cal/g
Capacità termica	16.32 cal/mol · K	6.4 cal/mol · K
Conduttività termica	0.412 W/cm · K	4.9 W/cm · K
Coeff. di espansione termica a	$7.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$4.68 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Coeff. di espansione termica b	$8.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$4.2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Tabella 1.2: Caratteristiche di zaffiro e carburo di silicio [6].

La necessità di coniugare le prestazioni elevate del carburo di silicio con costi di produzione contenuti ha recentemente portato allo sviluppo di un nuovo tipo di substrato composito che fosse in grado di contenere il mismatch reticolare conservando le proprietà elettriche ad un

costo inferiore. Il substrato sviluppato per rispondere a queste esigenze è il SiCopSiC: l'utilizzo del SiC su carburo policristallino sembra essere un'ottima alternativa ai substrati classici, poiché combina i costi ridotti del carburo policristallino con le caratteristiche di dissipazione termica del SiC.

1.4 Tecnologie di produzione

Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse tecniche per la crescita del nitruro di gallio, tra le più importanti ricordiamo:

- HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy)
- MBE (Molecular Beam Epitaxy)
- MOVPE (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy)
- MOMBE (Metal-Organic Molecular Beam Epitaxy)

La crescita epitassiale è la deposizione di sottili strati di materiale cristallino su un substrato massivo, anch'esso cristallino, che ne indirizza la crescita e ne determina le proprietà strutturali. Fondamentale è ottenere strati epitassiali il più possibile privi di difetti e controllare lo spessore durante la crescita. I più utilizzati sono i metodi MBE e MOVPE.

HVPE

Introdotta negli anni '70, l'HVPE è stata una delle prime tecnologie utilizzate per la crescita del nitruro di gallio. Per ottenere il gallio si sfrutta il GaCl, prodotto dalla reazione tra Ga metallico e acido cloridrico (HCl) nello stato gassoso alla temperatura di circa 850 °C. Successivamente il GaCl viene portato in prossimità della superficie del substrato dove reagisce con l'ammoniaca (NH₃) a 900 ÷ 1100 °C formando il GaN. La reazione è:



Questo metodo è stato abbandonato già negli anni '80 perché, pur presentando una velocità di crescita molto elevata, circa 30 μm/h (due ordini di grandezza superiore agli altri processi), gli strati ottenuti hanno una bassa qualità reticolare. Oggi viene utilizzata esclusivamente per produrre substrati di GaN, il quale viene fatto crescere su zaffiro, successivamente rimosso. Il nitruro di gallio così prodotto è utilizzato per la crescita omoepitassiale, sfruttando il fatto che, crescendo grandi spessori, gli strati superiori presenteranno meno difetti e dislocazioni [7].

MBE

L'epitassia da fasci molecolari è stata utilizzata, fin dalla sua scoperta, per la crescita di nitruri, composti II-VI e silicio. Ha il notevole vantaggio di poter essere realizzata a temperature molto inferiori a quelle utilizzate in VPE. Inizialmente la sorgente di N utilizzata per la crescita fu l'ammoniaca (NH_3), perchè l'elevata energia di legame della molecola di azoto, non permetteva di utilizzare il N_2 . Successivamente fu possibile utilizzare azoto semplice, dissociando preliminarmente la molecola N_2 con sorgenti al plasma (PMBE, Plasma-Assisted MBE). Questo processo può essere fatto prima che l'azoto raggiunga il substrato, ciò permette di mantenere bassa la temperatura di crescita indipendentemente dalla rottura dei legami di N_2 . Le sorgenti sono quindi contenute in celle separate, dette celle di Knudsen, ad una pressione di 10^{-6} torr all'interno delle quali viene ottenuta un'evaporazione controllata delle diverse specie (fasci molecolari). Nella camera di crescita, mantenuta in condizioni di ultra alto vuoto (UHV) a 10^{-10} torr di pressione, i fasci molecolari raggiungono il substrato riscaldato, sulla superficie del quale avviene la deposizione. Infine gli atomi di gallio vengono ottenuti per evaporazione termica. L'utilizzo dell'UHV, comunque non facile da realizzare, permette di impiegare un raggio elettronico per effettuare misure di diffrazione dello strato durante la crescita (RHEED, Reflection High Energy Electron Diffraction).

I fasci molecolari possono essere inviati o interrotti per mezzo di opportuni schermi (shutter) in tempi dell'ordine di decimi di secondo, ottenendo un accuratissimo controllo sulla composizione dello strato depositato, spessori dell'ordine del nanometro e interfacce molto nette tra strati di composizione diversa. Inoltre il fatto che le temperature di crescita siano basse riduce la generazione di difetti reticolari, però porta anche ad una bassa velocità di

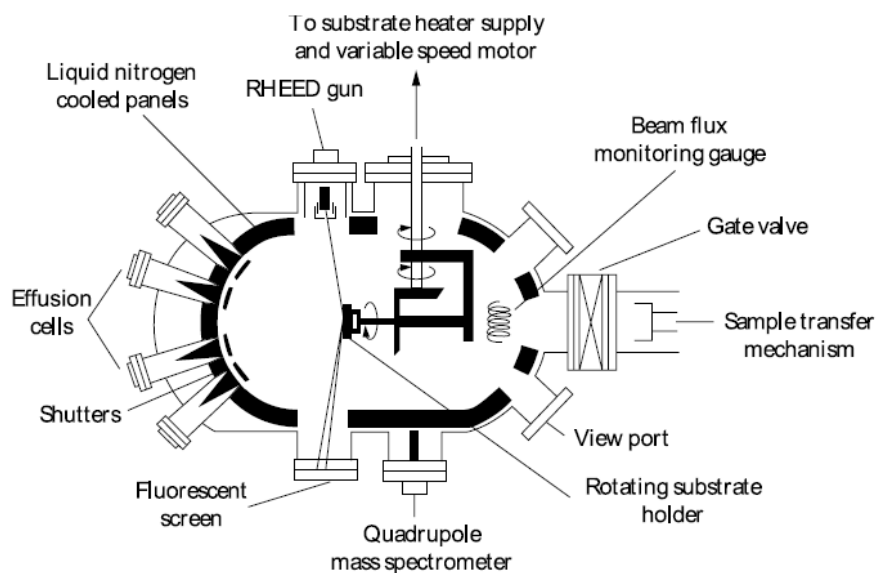


Figura 1.7: Schema di un reattore MBE.

crescita tipicamente tra gli 0.5 e i 2 $\mu\text{m/h}$. La crescita eteroepitassiale del GaN direttamente su substrati di zaffiro o carburo di silicio tramite MBE porta a risultati peggiori, inerentemente alle proprietà elettriche e ottiche del materiale ottenuto, rispetto a quella mediante MOVPE. Per ricavare comunque ottimi materiali, si ricorre alla crescita di un primo strato buffer tramite MOVPE per poi proseguire con MBE. Al contrario, se fosse possibile partire direttamente da un substrato di GaN, la qualità dei film cresciuti con MBE supererebbe quella dei film ottenuti con MOVPE.

MOVPE

Questa tecnica, chiamata anche MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition), è stata introdotta nel 1960 ed è basata sulla reazione in fase di vapore di alcali del III gruppo con idruri del V gruppo, in zone portate ad alte temperature e pressione atmosferica. La MOVPE può essere adattata a far crescere qualsiasi semiconduttore del III-V e del II-VI gruppo. Questa tecnica permette una crescita relativamente rapida $3 \div 4 \mu\text{m/h}$, ma presenta delle dislocazioni ed un'alta quantità di difetti a causa delle elevate temperature richieste per rompere il legame N-H. Inoltre per ottenere buone caratteristiche del film finale il rapporto tra le concentrazioni di atomi del gruppo III e V deve essere maggiore di 1000 per il GaN e l'AlGaIn; quest'ultimo però presenta una crescita molto più lenta, per ottenere InGaIn invece il rapporto deve essere maggiore di 10000.

Per la crescita sono utilizzati dei precursori: Trimetilgallio (TMG) o Trietilgallio (TEG) come fonti di gallio, ammoniaca come fonte di azoto, Trimetilalluminio (TMA) e Trimetilindio (TMI) come fonti rispettivamente di alluminio e indio. Questi precursori vengono trasportati sul substrato da flussi di idrogeno e azoto. Il substrato, solitamente di zaffiro, è mantenuto ad una temperatura di 1050 °C, poi fatta scendere fino a 550 °C per la crescita di uno strato buffer di nitruro di alluminio, alla quale segue quella del GaN a circa 1000 °C.

I primi film di GaN ottenuti con MOVPE presentavano un elevato drogaggio n non intenzionale e una bassa mobilità, questo era dovuto alle alte velocità dei flussi gassosi che non permettevano la crescita uniforme del cristallo. I problemi furono risolti da alcune modifiche introdotte al processo da Nakamura nel 1990, il quale ideò la così detta Two Flow MOCVD (TF-MOCVD). In Figura 1.8 sono mostrati reattore e principio di funzionamento della TF-MOCVD. Come si può vedere nel reattore arrivano due diversi flussi: il primo, il flusso principale, è parallelo al substrato e porta il gas di reazione ($\text{TMG} + \text{NH}_3 + \text{H}_2$); il secondo trasporta un gas inerte ($\text{H}_2 + \text{N}_2$) per la crescita del nitruro di gallio in direzione perpendicolare al substrato. Lo scopo del flusso perpendicolare è quello di portare il flusso

principale a contatto con il substrato in modo uniforme, con questo sistema è possibile ottenere un film di GaN continuo e di qualità superiore.

Utilizzando la MOVPE si arriva quindi a realizzare strati di buona qualità, con un processo relativamente semplice e molto efficace.

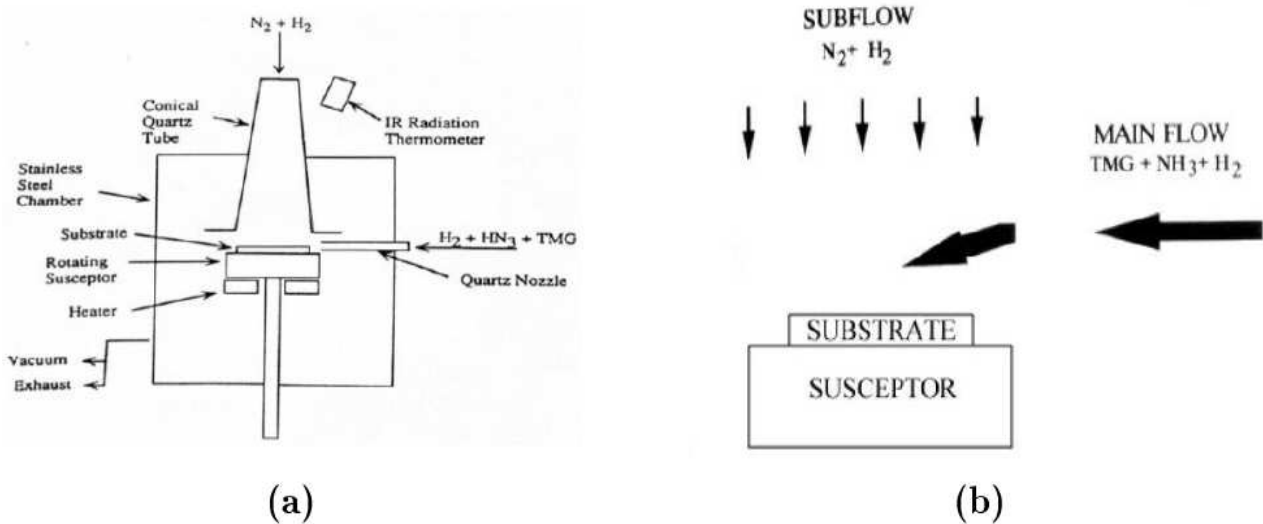


Figura 1.8: Reattore (a) e principio di funzionamento (b) per la TF-MOCVD.

1.5 Contatti ohmici

Esistono sostanzialmente due modi per ottenere un contatto metallo semiconduttore di tipo ohmico:

Contatto “tunnel”. Drogando fortemente il semiconduttore è reso trascurabile l'effetto di barriera schottky sul flusso elettronico, la larghezza di barriera si riduce fortemente in modo da permettere agli elettroni di attraversarla per effetto tunnel. Quest'ultimo è un effetto quantistico che prevede la probabilità non nulla di attraversamento di una barriera da parte di una particella con energia inferiore alla barriera stessa. Tale probabilità è tanto più grande quanto più la barriera è sottile.

Contatti ohmici di tipo schottky. In un semiconduttore di tipo n avente lavoro di estrazione maggiore di quello del metallo i portatori maggioritari si accumulano alla superficie del semiconduttore. Per neutralità di carica sulla superficie del metallo si accumula un sottile strato di carica positiva [8].

Solitamente i contatti ohmici realizzati su semiconduttori nitruri di tipo n includono uno strato di titanio (Ti) depositato direttamente sul semiconduttore. Il secondo strato metallico è spesso di alluminio (Al), ma è comune anche l'uso di strati addizionali composti da platino/oro (Pt/Au), nichel/oro (Ni/Au) e titanio/oro (Ti/Au). Il procedimento richiede l'impiantazione di silicio sulla superficie seguita da annealing termico [9]. Per contatti realizzati su AlGaN tipo n è stata studiata l'influenza di pretrattamenti chimici e la scelta dei gas di annealing. Questi processi hanno lo scopo di aumentare la densità di portatori nel semiconduttore in prossimità dell'interfaccia. Alcuni studi hanno mostrato che la qualità del contatto migliora dopo aver trattato la superficie con acido cloridrico (HCl), perchè elimina l'ossidazione superficiale [10].

In Figura 1.9 è rappresentata la caratteristica I-V della giunzione formata dal GaN con alcuni metalli. Più tale caratteristica è lineare e a pendenza elevata (che equivale a bassa resistività) migliore sarà il contatto ohmico.

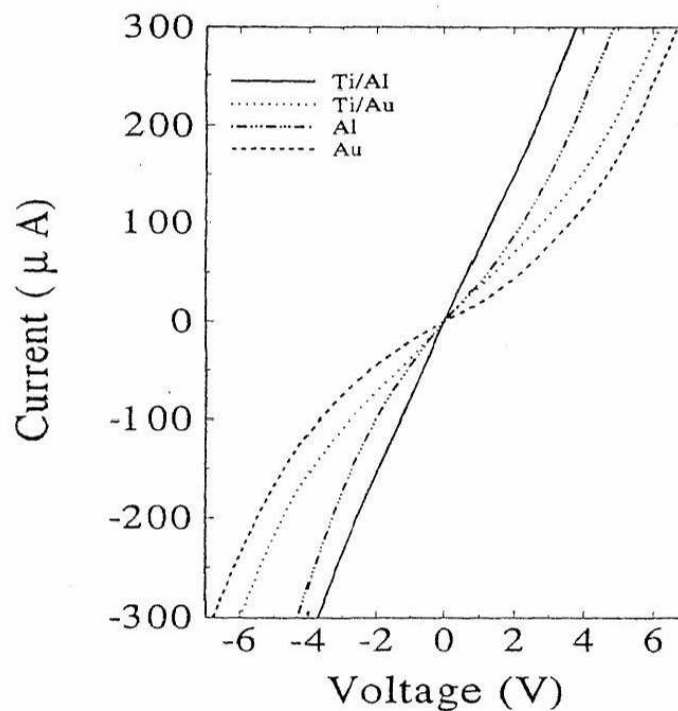


Figura 1.9: Caratteristica I-V della giunzione tra GaN e alcuni metalli usati per contattarlo.

Capitolo 2

HEMT

2.1 Eterostruttura

Un'eterostruttura è formata dal contatto di due semiconduttori con livelli di energy gap diversi e con costanti reticolari compatibili: si creano due strati (layer) diversi, “strato barriera” e “strato canale” (buffer). Per ridurre al minimo i difetti all'interfaccia i due materiali devono avere la stessa orientazione cristallografica. La banda di conduzione della barriera deve essere ad un livello energetico maggiore rispetto alla banda di conduzione del buffer, in questo modo gli elettroni sono confinati nel canale. I nitruri sono i materiali più utilizzati nella costruzione di eterostrutture per le loro potenziali applicazioni in elettronica e ottica. Questi materiali ricoprono un energy gap da 0.8 eV fino a 6.2 eV e sono utilizzabili per emissione di luce in tutto il range del visibile. Parametri importanti, come la discontinuità tra le bande di conduzione e la mobilità elettronica, possono essere ottimizzati crescendo eterostrutture con costanti reticolari diverse, utilizzando come strato barriera materiali contenenti alluminio (o anche indio). È possibile realizzare eterostrutture molto raffinate, con passaggi da un semiconduttore ad un altro con precisione atomica, per mezzo delle tecniche di crescita epitassiale descritte precedentemente. Tali tecniche permettono di depositare i materiali con una tale accuratezza da fornire una gamma di possibilità estremamente vasta alla realizzazione di eterostrutture.

2.2 Eterostruttura AlGaN/GaN degli HEMT

Negli HEMT tradizionali in GaAs e InP lo strato barriera viene drogato con atomi donori mentre il buffer viene lasciato intrinseco. Dalla differenza tra le bande di conduzione dei due

materiali deriva un trasferimento dallo strato barriera al buffer di elettroni, ed il confinamento di questi in una buca quantica di pochi nanometri. In questa regione, gli elettroni formano quindi un gas elettronico bidimensionale (2DEG), la mobilità elettronica risulta quindi molto elevata, avvicinandosi addirittura a quella dei semiconduttori intrinseci, in quanto gli elettroni non risentono dello scattering coulombiano con le impurità che li hanno generati, essendone fisicamente separati.

Un effetto fisico che domina il comportamento del dispositivo e che può inoltre determinare difetti di densità nello strato è la natura polare del GaN e dell'AlGaN [1]. Questo effetto è più marcato nell'AlGaN a causa dell'alluminio presente nella lega. Per la sua struttura reticolare, il cristallo di GaN (Figura 2.1) può avere due tipi di superfici, una con atomi di gallio (Ga-face) e una con atomi di azoto (N-face); per tale ragione possono esistere due tipi diversi di polarità. Se la superficie è del tipo Ga-face, il vettore polarizzazione punta fuori dalla superficie verso il substrato, viceversa nel caso di N-face la direzione della polarizzazione è invertita. Quasi tutte le tecniche MOCVD crescono nitruri con superficie Ga-face. I cristalli cresciuti con MBE sono invece del tipo N-face, ma la polarizzazione può essere invertita facendo crescere uno strato buffer di AlN prima della crescita per MBE.

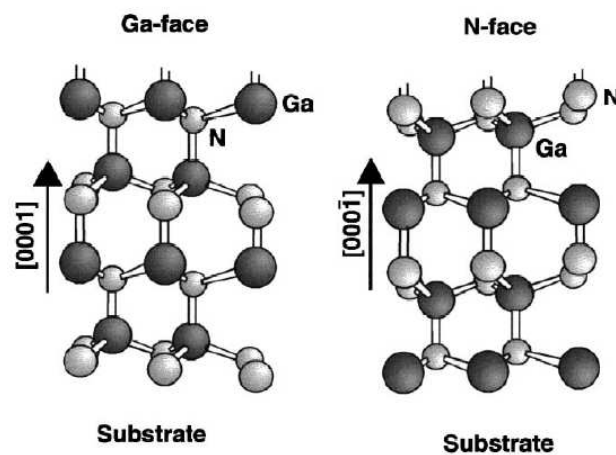


Figura 2.1: Struttura cristallina del GaN nelle polarità Ga e N.

Tuttavia con la sola polarizzazione spontanea non è possibile spiegare la formazione del 2DEG. Esiste infatti una seconda componente di polarizzazione, di natura piezoelettrica. Essa è dovuta allo stress di tensione meccanica causato dalla differenza di costanti reticolari di GaN e AlGaN. La differenza di polarizzazione che si instaura nei due materiali causa la formazione di uno strato di carica positiva nello strato di barriera, la quale attrae elettroni liberi nel GaN (Figura 2.2). Questi elettroni vengono quindi confinati in una buca quantica grazie alla barriera dovuta alla differenza di energy gap dei due materiali. In questo caso

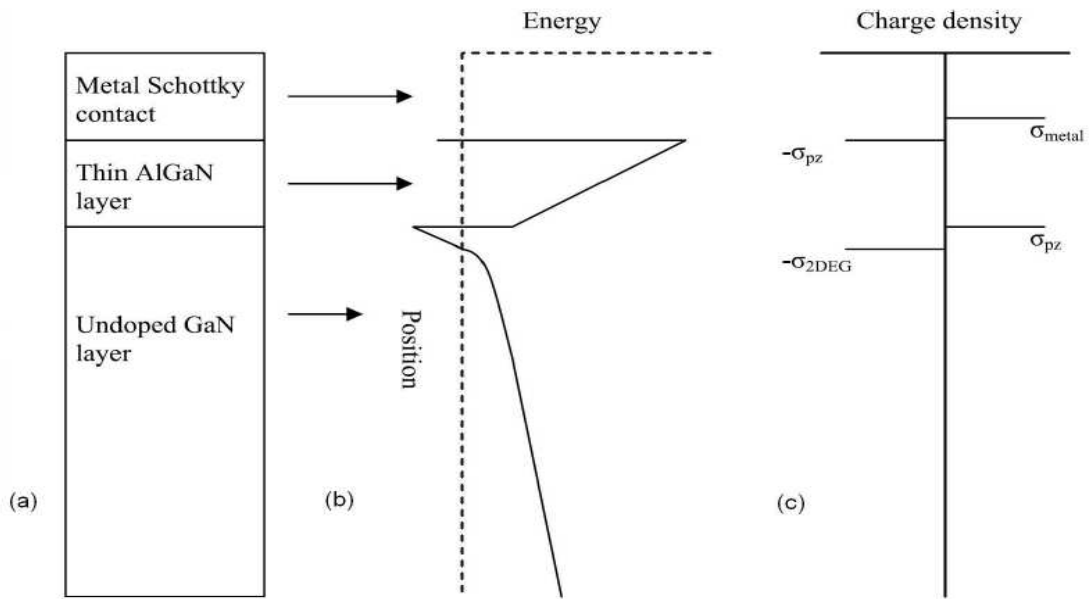


Figura 2.2: (a) Struttura del dispositivo; (b) Diagramma a bande; (c) Densità di carica.

quindi il 2DEG si forma senza drogaggio intenzionale e senza l'applicazione di tensione elettrica, e tale caratteristica appartiene esclusivamente all'eterostruttura AlGaIn/GaN. Si ipotizza che gli elettroni che vanno a formare il 2DEG provengano dagli stati donori superficiali [11]. In base a questa ipotesi, variando lo spessore dello strato di barriera AlGaIn, cambia la densità di carica nel 2DEG. Finché non viene raggiunto un spessore minimo dello strato di barriera (*spessore critico di barriera*) i donori superficiali non cedono i loro elettroni. Lo spessore critico coincide con la condizione per cui i donori superficiali raggiungono il livello di Fermi. In Figura 2.3 è rappresentato il diagramma a bande di una eterostruttura

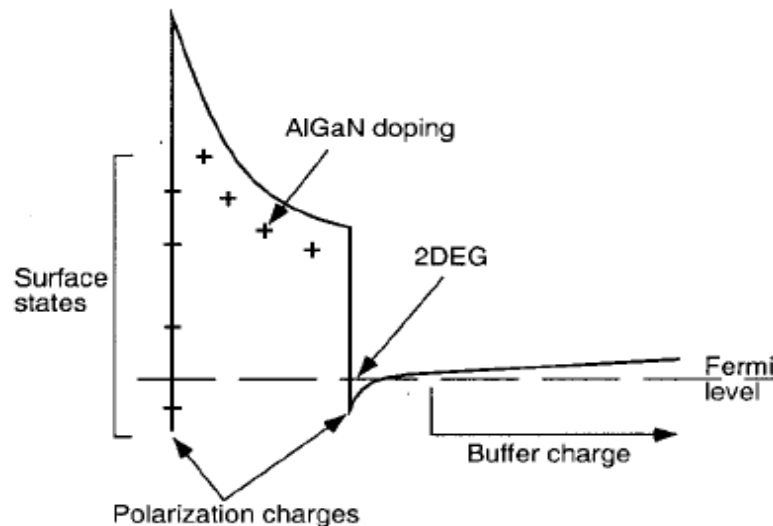


Figura 2.3: Diagramma a bande di un'eterostruttura AlGaIn/GaN.

AlGaIn/GaN mentre la relazione tra la densità del 2DEG e lo spessore dello strato di barriera è mostrata nel grafico di Figura 2.4(c).

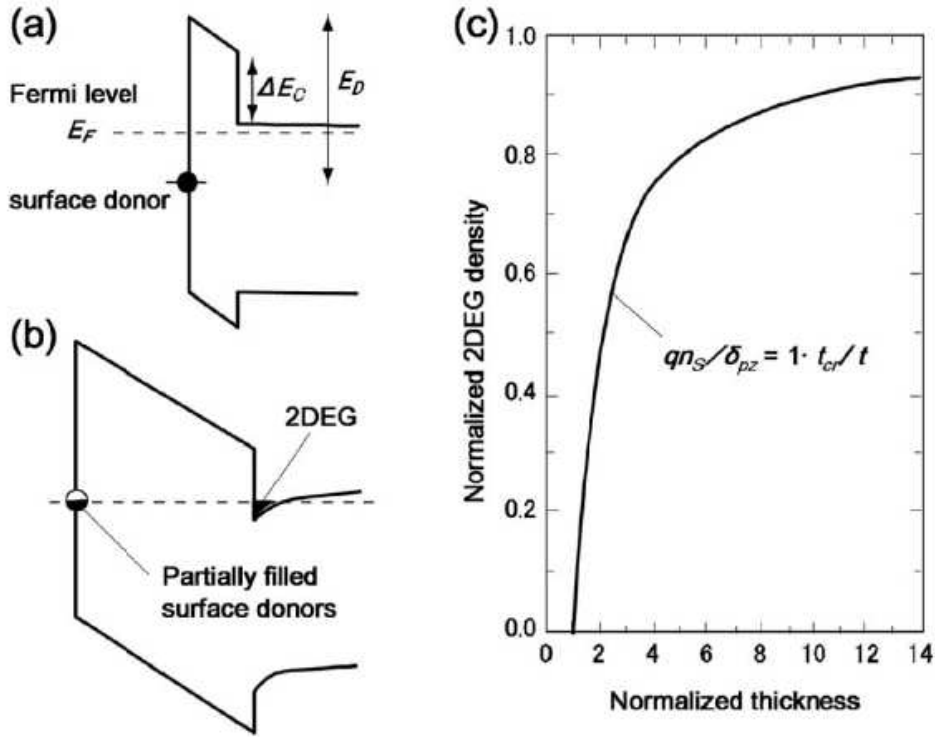


Figura 2.4: Modello dei donori superficiali con spessore di AlGaIn intrinseco minore (a) e maggiore (b) dello spessore critico di barriera; (c) densità calcolata nel 2DEG in funzione dello spessore di barriera [11].

Tuttavia tale relazione è valida per spessori inferiori ad un certo valore, dopo il quale cominciano ad essere rilevanti altri processi, come il rilassamento da stress meccanico, che causano un calo della densità e della mobilità del 2DEG. In Figura 2.5 viene mostrata la struttura base di un AlGaIn/GaN HEMT. Il substrato è tipicamente in zaffiro o in carburo di silicio. Su di esso vengono cresciuti epitassialmente uno o più strati “nucleation layer”, al fine di ridurre il mismatch tra substrato e GaN.

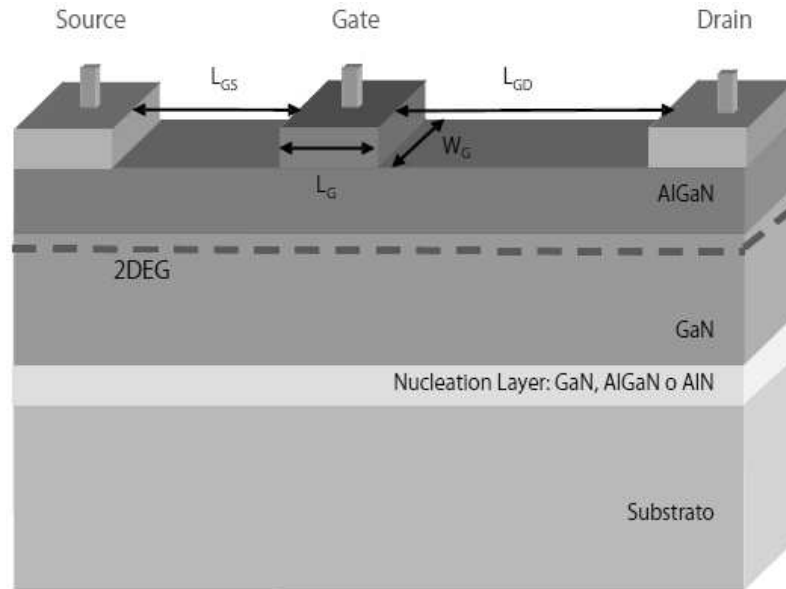


Figura 2.5: Struttura base di un HEMT

L'eteroepitassia su strati molto diversi dal punto di vista cristallografico rende il nucleation layer uno degli aspetti più critici della crescita. I materiali impiegati sono solitamente GaN, AlGaN o AlN. Sopra il nucleation layer si trova il channel layer in GaN e il barrier layer in AlGaN che formano l'eterogiunzione. In cima a tutta la struttura vengono depositati i contatti ohmici di drain e source e il contatto Schottky di gate, dopo aver effettuato un adeguato isolamento del dispositivo ed eventualmente uno strato di passivazione di nitruro di silicio (SiN).

2.3 Fenomeni di intrappolamento di carica

Le prestazioni, soprattutto per quanto concerne l'elevata potenza alle microonde, raggiunte dagli HEMT su GaN negli ultimi anni, hanno portato molto interesse su questi dispositivi, che però necessitano ancora di parecchi miglioramenti per sfondare definitivamente nel campo applicativo.

Un'area di particolare interesse per la ricerca è quella legata all'effetto delle trappole sulle prestazioni del dispositivo. Le trappole formano infatti una distribuzione di carica quasi statica sia sulla superficie del wafer che nello strato del buffer sotto al canale; ciò provoca una riduzione dell'escursione della corrente di drain, che di conseguenza limita la potenza d'uscita alle alte frequenze. Inoltre questi stati provocano un ritardo nella risposta del dispositivo, a causa di processi di trapping/detrapping, limitando lo sviluppo di amplificatori di potenza a microonde, campo di utilizzo preferenziale degli HEMT.

Come mostrato in Figura 2.6 le trappole si possono trovare: alla superficie dell'AlGaN, nello strato barriera o nel buffer di GaN. Nonostante sia noto che esistano dei difetti nello strato di AlGaN, non è stata ancora stabilita una loro correlazione con il calo della potenza di uscita alle microonde, quindi lo studio si è focalizzato sulle trappole alla superficie e nel buffer.

Gli effetti da intrappolamento di carica sono numerosi, tra i più importanti ci sono la dispersione della transconduttanza in frequenza, il collasso di corrente nelle caratteristiche DC dopo uno stress di polarizzazione, i transienti nel gate-lag e nel drain-lag, la fotosensibilità e ovviamente una minor potenza di uscita alle microonde.

La difficoltà nel comprendere ed eliminare questi effetti è essenzialmente legata al fatto che non esiste ancora un accordo sulla natura delle trappole e che le prestazioni dei dispositivi sono abbastanza variabili in relazione alla qualità dei materiali, alla struttura dei layer e alle tecniche di crescita. Viste le analogie, molti studi sul fenomeno dell'intrappolamento sono stati ricondotti a quelli fatti in passato per la tecnologia GaAs [12].

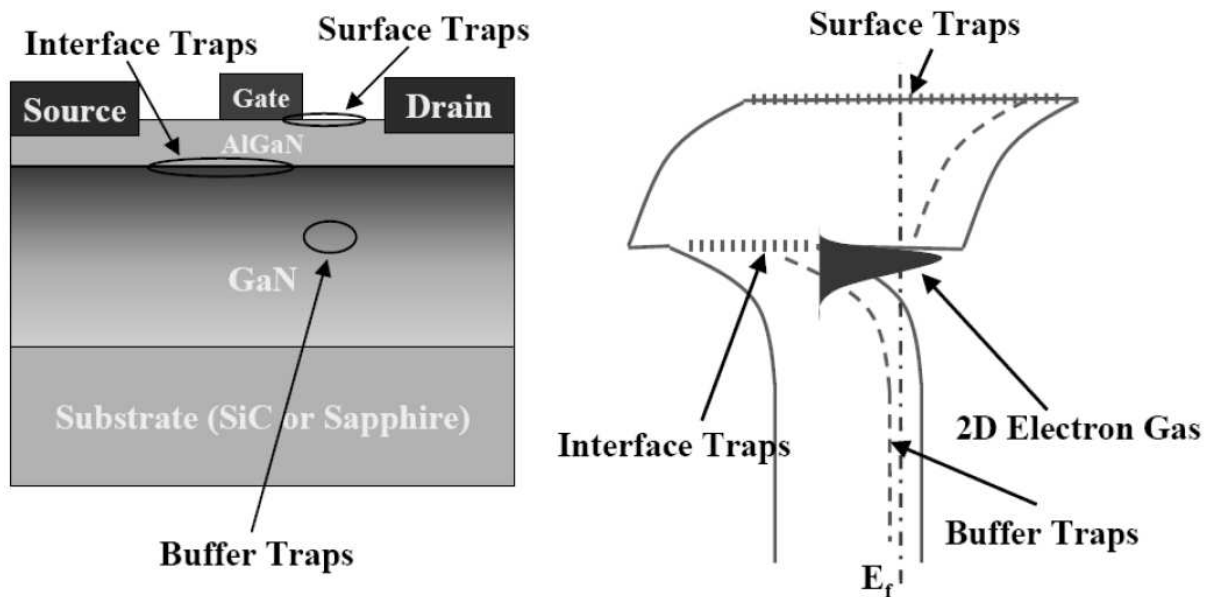


Figura 2.6: Origine delle trappole nei dispositivi AlGaN/GaN a livello fisico e a livello di diagramma a bande.

2.3.1 Collasso di corrente

Con collasso di corrente si intende la riduzione della corrente di drain misurata in DC, dopo l'applicazione di elevate tensioni drain-source [13]. Questo fenomeno, conosciuto anche come “kink” e studiato per la prima volta nel 1994 da Khan et al. [14], è ben esemplificato in Figura

2.7 dove sono riportate le caratteristiche di uscita I_D su V_{DS} in due diverse condizioni di polarizzazione massima. Nella misura graficata con le linee tratteggiate la V_{DS} massima applicata è 10 V, mentre quella rappresenta con linee continue la V_{DS} è portata fino a 20 V. Confrontando le due caratteristiche si vede una riduzione della corrente per valori di V_{DS} inferiori a 8 V, infatti in questa zona le linee continue sono deformate e rimangono sotto rispetto alle corrispondenti tratteggiate, evidenziando un legame tra collasso di corrente e stress di polarizzazione.

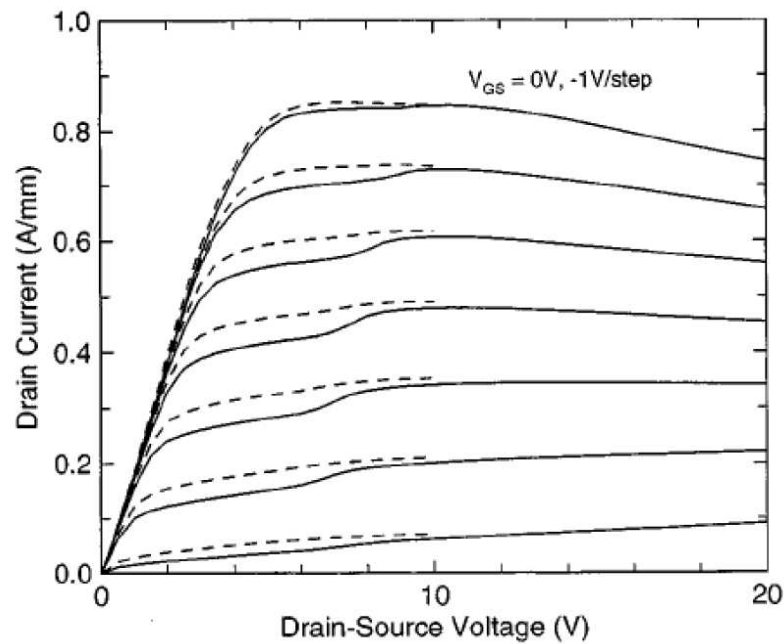


Figura 2.7: Caratteristica DC per un AlGaIn/GaN HEMT. Le linee tratteggiate si riferiscono ad una misura con V_{DS} massima pari a 10V, mentre le linee continue, si riferiscono ad una misura con V_{DS} fino a 20V [13].

Il fenomeno del collasso di corrente viene attribuito all'intrappolamento di elettroni caldi nel buffer di GaN; portando il dispositivo ad una tensione drain-source elevata è possibile attivare un certo numero di trappole nel buffer e, a causa di ciò, ad una misura successiva il numero di elettroni liberi nel canale sarà ridotto, diminuendo il valore della corrente, finché non si raggiunge una tensione sufficiente da liberare gli elettroni intrappolati.

La corrente di drain può essere ristabilita illuminando il dispositivo, la fonte di luce impiegata per questo scopo deve però avere energia luminosa prossima al bandgap del GaN; se invece si utilizzano sorgenti a diverse lunghezze d'onda si può ricavare l'energia associata alle trappole valutando da quale valore di λ si riscontra recovery sulla corrente. Inoltre i tempi impiegati per il recupero del valore di corrente forniscono informazioni sulla natura delle trappole; vista

la probabile presenza di trappole diverse, la dipendenza temporale può avere più di una componente.

2.3.2 Dispersione in frequenza

La dispersione in frequenza è un altro fenomeno che affligge pesantemente i GaN HEMT. Consiste nel fatto che quando il dispositivo opera ai grandi segnali raggiunge valori di corrente di drain più piccoli rispetto a quelli ottenuti in continua, e la tensione di ginocchio aumenta. Questo provoca un degrado delle prestazioni in termini di potenza alle radiofrequenze e alle microonde [15]. È stato dimostrato [16] che la compressione della corrente alle alte frequenze è dovuta a fenomeni di intrappolamento di carica localizzati nello strato barriera AlGaIn e nello strato superficiale, mentre in questo caso sono trascurabili gli effetti dell'intrappolamento di elettroni caldi nel buffer.

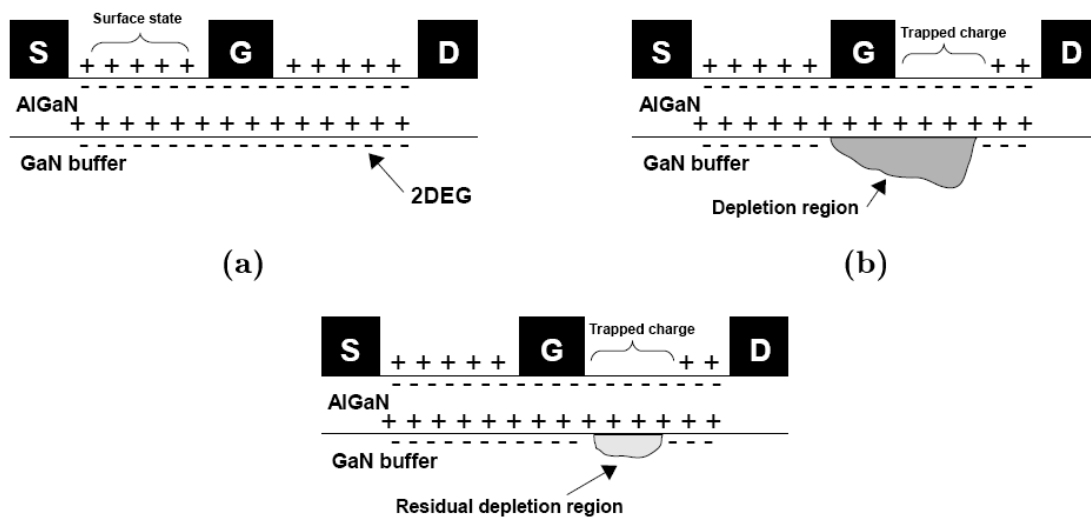


Figura 2.8: Fenomeno della dispersione in frequenza.

Questo fenomeno viene spiegato considerando il fatto che in condizioni di normale funzionamento del dispositivo, quindi con il canale formato, gli stati superficiali si comportano come dei donori e cedono il loro elettrone. Viene così a formarsi uno strato di carica positiva sulla superficie libera dell'AlGaIn, che compensa la carica nel canale 2DEG. Tuttavia questa carica può essere parzialmente neutralizzata se sono presenti elettroni sulla superficie esterna, con la conseguente riduzione degli elettroni nel canale ed estensione della

regione di svuotamento. Infatti in condizioni di canale chiuso, mediante tunneling dal gate polarizzato negativamente, gli elettroni tendono ad andare a compensare tale carica positiva. A questo punto, a causa delle lunghe costanti di tempo delle trappole, i livelli superficiali non riescono a tornare istantaneamente nelle condizioni iniziali, causando un accumulo di carica negativa che mantiene spento parte del canale. Si ha quindi una riduzione della corrente di drain rispetto al caso stazionario di polarizzazione DC. Il fenomeno può essere modellizzato da un secondo gate, chiamato “gate virtuale”, in serie a quello reale [15]. Si può considerare che il potenziale del gate reale sia controllato dalla tensione applicata, mentre il potenziale del gate virtuale sia controllato dal livello di carica intrappolata. Quindi la corrente di drain, basandosi su questa teoria, è controllata sia dalla polarizzazione di gate che dai meccanismi che forniscono e rimuovono carica dal gate virtuale.

Per riportare la corrente a valori normali è necessario ristabilire la carica positiva sulla superficie, ciò può essere ottenuto polarizzando direttamente il gate reale rispetto a source e drain, oppure utilizzando una fonte di luce. In quest’ultimo metodo i fotoni, che devono avere energia superiore all’energy gap del GaN, creano coppie elettroni lacune nello strato buffer. Le lacune vengono spinte verso la superficie dal campo elettrico presente nell’AlGaIn, polarizzando direttamente la superficie ed eliminando il gate virtuale (Figura 2.9).

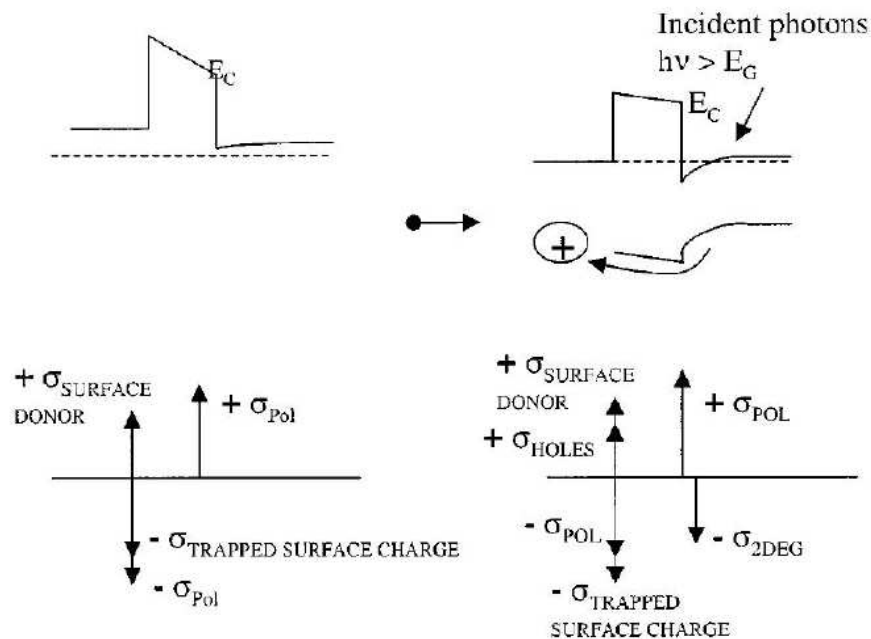


Figura 2.9: Effetto dei fotoni con energia superiore all’energy gap del GaN sul gate virtuale.

2.3.3 Soluzioni per ridurre i fenomeni legati alle trappole

Per ridurre i fenomeni legati alle trappole, in particolare le degradazioni dovute a trappole superficiali, possono essere adottate diverse soluzioni. La più utilizzata è la passivazione, che consiste nella deposizione di un film isolante tipicamente Nitrato di Silicio (Si_3N_4). Si realizza così una quasi ottima interfaccia dielettrico/semiconduttore, che meglio neutralizza la carica superficiale data da legami pendenti, difetti superficiali e cariche residue. Non si ottengono però risultati sempre uniformi: dopo la deposizione di questi strati, hanno infatti un ruolo molto importante la superficie e la qualità del materiale e della deposizione. In ogni

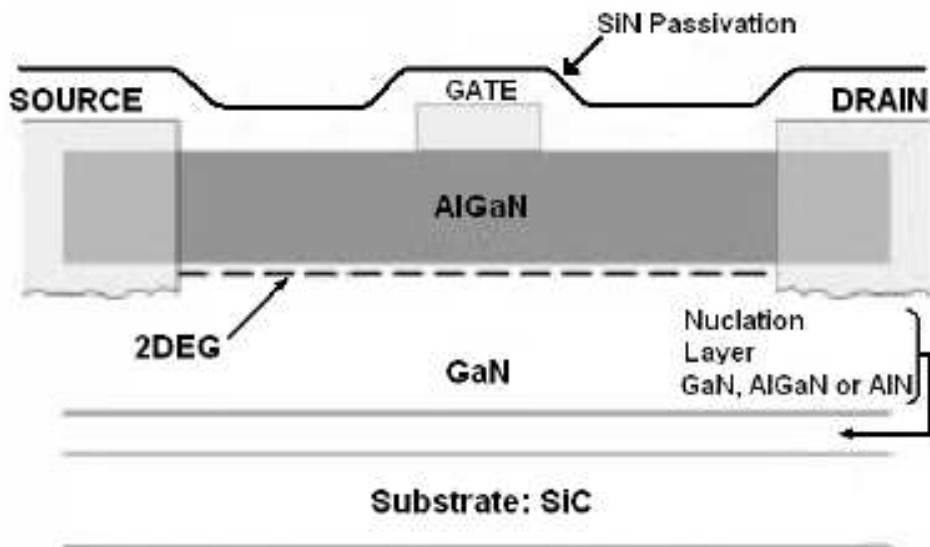


Figura 2.10: Passivazione di un AlGaIn/GaN HEMT.

modo si possono ottenere, nel caso migliore anche miglioramenti del 100% sulle caratteristiche di uscita. La passivazione dà buoni risultati nella diminuzione della dispersione in frequenza, invece non modifica l'effetto di collasso di corrente, evidentemente perché questo è dovuto alla presenza di trappole nel buffer e non superficiali. In Figura 2.11 si vede come l'impiego della passivazione aumenti il valore della corrente, ma l'effetto di degrado non viene eliminato. Il collasso può invece essere ridotto con l'impiego di strati buffer ad alta conducibilità.

Un altro metodo per ridurre i problemi di dispersione è l'uso del *field plate*. Questo sistema consiste nella realizzazione di un gate a forma di T o Γ che copre parzialmente la zona gate-drain. In questo modo viene ridistribuito il campo elettrico tra gate e drain, limitando gli

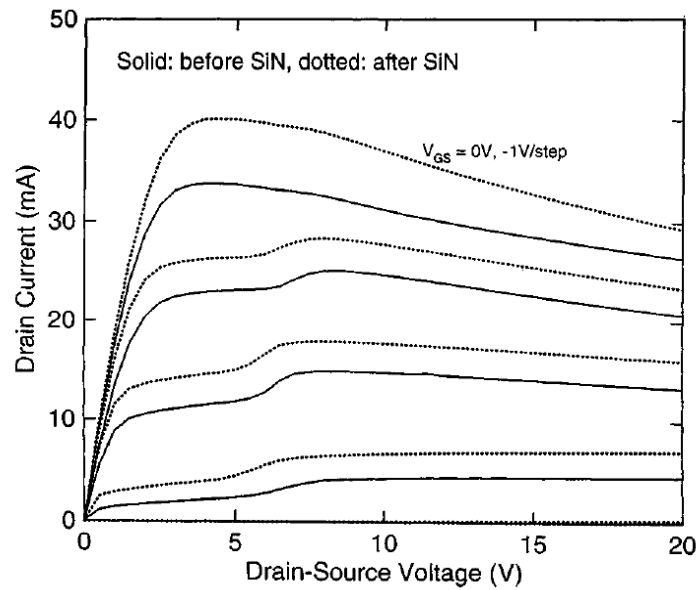


Figura 2.11: Caratteristica DC della corrente di drain prima, linee continue, e dopo, linee tratteggiate, la passivazione con SiN [13].

effetti delle trappole superficiali; è infatti proprio il campo elettrico la principale causa di migrazione delle cariche dal gate alle trappole. Il field plate permette di limitare picco del campo e di ridistribuirlo, con entità minore, per tutta la lunghezza della sovrapposizione gate-drain. Un terzo metodo che consente di limitare gli effetti superficiali è il *gate recess*, una tecnica che consiste nello spostare lo strato barriera più in profondità, sormontato da altri strati in AlGaN o GaN che, allontanando la superficie dal canale, permette di limitare gli effetti di dispersione anche in assenza di passivazione superficiale.

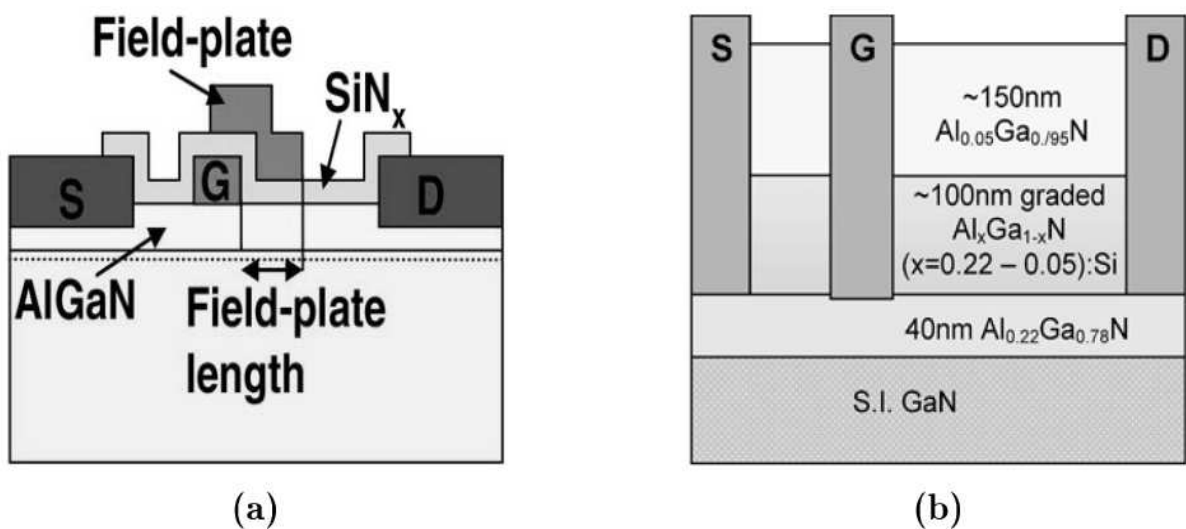


Figura 2.12: HEMT con field plate (a) e con struttura a gate recess (b) [17].

2.4 Fenomeni di degrado

Oltre all'intrappolamento di carica vi sono altri meccanismi che contribuiscono al degrado dei dispositivi AlGaIn/GaN HEMT come l'instabilità termica dei contatti Schottky o ohmico, il fenomeno degli elettroni caldi e l'effetto piezoelettrico inverso. Questi tre effetti vengono localizzati nelle aree indicate in Figura 2.13.

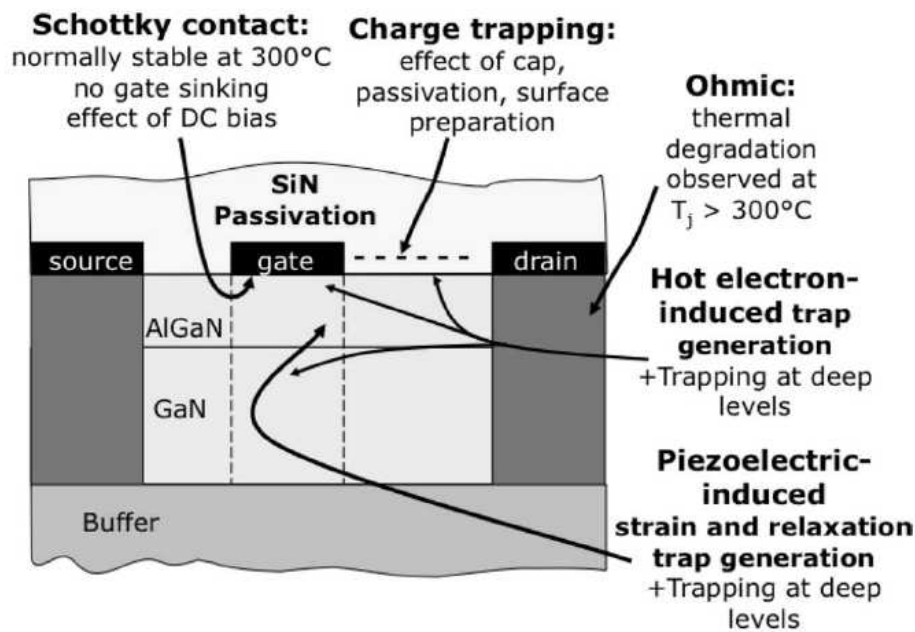


Figura 2.13: Sezione trasversale di un AlGaIn/GaN HEMT, nella quale si evidenziano le zone critiche che possono essere soggette a degrado.

2.4.1 Stabilità dei contatti Schottky e ohmico

Il "gate sinking", ovvero lo sprofondamento del materiale di gate all'interno dello strato epitassiale di canale, è stato identificato per la prima volta nel 1986 [18] ed è stato dimostrato essere uno dei principali meccanismi di rottura degli HEMT. Al contrario, i contatti Schottky Ni/Au, Pt/Au, e Mo/Au su GaN sembrano essere abbastanza termicamente stabili, e nessun effetto di "gate sinking" o di interdiffusione di metallo sono stati riportati finora. È stata studiata, inoltre, la stabilità dei 0.25 μm AlGaIn/GaN HEMT adottando diodi Schottky Pt/Au e stack metallici riscaldati Ti/Al/Pt/Au come contatti ohmici. Effettuando un ciclo di step stress di 48 ore, applicando una V_{DS} pari a 10 V con una densità di corrente di 500 mA/mm (e con relativo aumento della temperatura di giunzione da 300 °C a 390 °C), si è visto che le

caratteristiche I-V del diodo Schottky rimangono invariate, e non si presenta alcuna interdiffusione metallo-gate rilevabile all'interno dei materiali epitassiali. Nonostante questo, diversi autori hanno riportato variazioni in altezza della barriera dello Schottky, dopo i trattamenti termici o i life - test, dimostrando che il consumo di uno strato interfacciale, tra la metallizzazione Schottky Ni/Au e lo strato AlGaIn, induce un aumento di altezza della barriera dello Schottky corrispondente ad uno spostamento della tensione di pinch-off verso valori positivi, con una conseguente riduzione di I_{DSS} . Uno studio più sistematico della stabilità dei contatti Schottky di gate in condizioni diverse è senza dubbio necessario. Ad esempio, le prove ad alta corrente di gate potrebbero essere utilizzate per emulare la polarizzazione diretta della giunzione di gate che si verifica durante il funzionamento RF con il dispositivo comandato in compressione, una condizione che spesso è accoppiata con un'elevata temperatura di giunzione [19].

2.4.2 Elettroni caldi

Lo scaling delle lunghezze di gate, giunte a dimensioni submicrometriche, non accompagnato da una riduzione significativa delle tensioni drain-source hanno portato i campi elettrici presenti nei dispositivi HEMT a valori sempre più alti, anche in condizioni operative. Questo porta gli elettroni a elevati livelli di energia. Gli effetti correlati alla presenza di portatori "caldi" sono di grande interesse principalmente per due motivi: la richiesta di tensioni di breakdown alte, che limitano le massime tensioni operative dei dispositivi [17] e la necessità di conoscere i problemi di affidabilità dovuti alla presenza di portatori caldi, che possono portare a degradazioni parametriche o a fenomeni di burnout [20].

Nel corso degli anni, misure specifiche e di elettroluminescenza sono state sviluppate e applicate per la caratterizzazione sperimentale dei fenomeni di hot-carrier negli HEMT.

In particolare in un generico HEMT su GaAs polarizzato ad alte tensioni drain-source, gli elettroni nel canale accelerati dall'elevato campo elettrico possono raggiungere energie sufficienti per generare coppie elettrone-lacuna per ionizzazione da impatto. I portatori secondari così creati sono raccolti al drain, assieme a quelli primari, e le lacune sono accelerate indietro verso il source ed il gate. Gli effetti della ionizzazione da impatto possono essere dunque caratterizzati andando a misurare la corrente negativa (uscente) di gate dovuta alla raccolta di lacune [21]. Il tasso di ionizzazione da impatto, cioè il rapporto $|I_G/I_D|$ è proporzionale al prodotto $\alpha \cdot L_{eff}$, dove α è il coefficiente di ionizzazione da impatto degli elettroni del canale e L_{eff} è l'estensione della regione di canale dove ha luogo la ionizzazione:

$$|I_G|/I_D \cong \alpha \cdot L_{eff} \cong L_{eff} \cdot \exp(-1/\xi) \cong L_{eff} \cdot \exp(-L_{eff}/(V_{DS} - V_{DSAT}))$$

Con ξ campo elettrico longitudinale nella regione L_{eff} e V_{DSAT} tensione di saturazione. In accordo con questa formula, graficando $\ln(|I_G|/I_D)$ in funzione di $1/(V_{DS}-V_{DSAT})$, si ottiene una linea retta. Negli HEMT su GaN però la corrente di gate è dominata da meccanismi di iniezione per effetto tunnel, per cui non può essere utilizzata per studiare gli effetti degli elettroni caldi. In questo caso allora si sfruttano misure di elettroluminescenza; polarizzando il dispositivo in opportune condizioni di funzionamento questo emette luce dai bordi del gate. Graficando il rapporto tra l'intensità della luce emessa e la corrente di drain in funzione di $1/(V_{DS}-V_{DSAT})$ si ottiene anche questa volta una linea retta (Figura 2.14). L'intensità della luce emessa risulterà quindi proporzionale alla concentrazione di elettroni caldi; Nakao et al. [22] e Shigekawa et al. [23] [24] hanno mostrato che la luce emessa dai GaN HEMT può essere

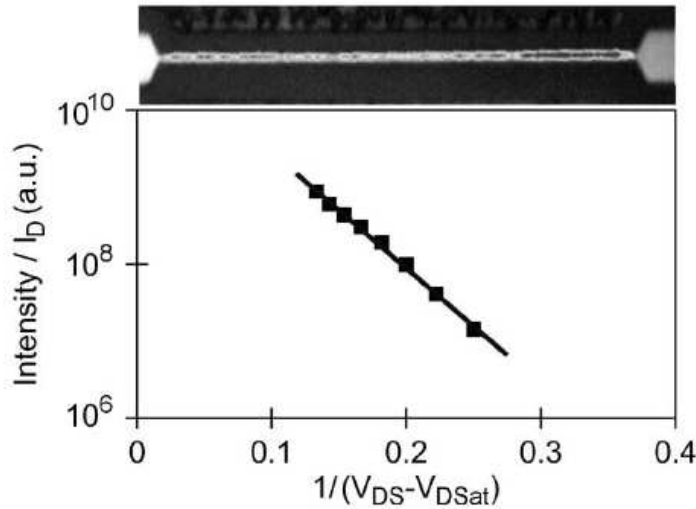


Figura 2.14: Fotoni/ I_D in funzione di $1/(V_{DS}-V_{DSAT})$.

dovuta a transizioni interne alla banda di conduzione di elettroni altamente energetici nella regione del canale ad alto campo elettrico. Misurando l'emissione al variare di V_{GS} mantenendo V_{DS} costante e graficando l'intensità luminosa in funzione di V_{GS} si ottiene un andamento a campana. Ciò si spiega considerando che per valori della tensione gate-source inferiori alla soglia, la tensione e il campo elettrico tra gate e drain sono massimi, ma non essendoci portatori nel canale, il dispositivo non emette luce. Facendo salire V_{GS} sopra la tensione di soglia, il canale inizia a formarsi e a popolarsi di portatori. Questi ultimi sono progressivamente accelerati dall'alto campo elettrico longitudinale diventando sempre più

energetici. In accordo con la presenza di elettroni caldi, viene rilevata emissione luminosa la cui intensità aumenta all'aumentare della V_{GS} . Aumentando V_{GS} aumenta il numero di elettroni nel canale, ma contemporaneamente cala il campo elettrico, di conseguenza superato un certo valore, l'intensità della luce emessa inizierà a calare perchè gli elettroni risulteranno meno energetici. Gli elettroni caldi possono generare trappole, aumentando così il collasso di corrente e la dispersione in frequenza, ma possono anche essere intrappolati in superficie, nell'AlGaIn o nel buffer da trappole preesistenti.

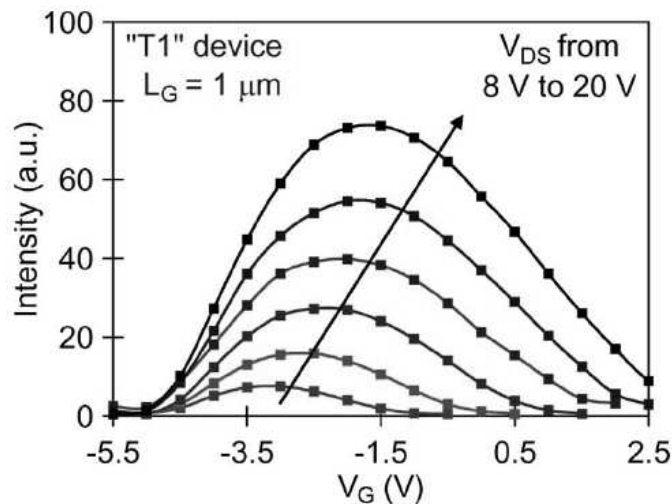


Figura 2.15: Fotoni in funzione di V_{GS} per diversi valori di V_{DS} .

2.4.3 Effetto piezoelettrico inverso

In molti casi presenti in letteratura non è possibile riconoscere la causa dell'invecchiamento dei dispositivi nella degradazione da elettroni caldi, almeno se si considerano solo gli elettroni del canale. In particolare sono stati riscontrati dei cambiamenti significativi nei parametri elettrici dei dispositivi e un aumento degli effetti di transitorio dopo test accelerati in OFF-state, in assenza quindi di corrente nel canale. Allora sono stati proposti altri possibili meccanismi di degradazione, dovuti unicamente al campo elettrico, che portano anch'essi alla generazione di trappole e all'intrappolamento di cariche con il conseguente calo della corrente di saturazione, della transconduttanza e l'aumento della resistenza serie.

Recentemente Joh e del Alamo [25] hanno supposto che il campo elettrico nella regione gate-drain incrementi la deformazione meccanica del reticolo nell'eterogiunzione AlGaIn/GaN chiamando questo fenomeno *effetto piezoelettrico inverso*. Il successivo rilassamento del

reticolo darebbe luogo alla formazione di difetti nel cristallo, e quindi a trappole. In particolare la corrente di gate aumenterebbe per fenomeni di tunneling assistito da trappole nello strato di AlGaN. Molti autori hanno dimostrato che si ottiene una miglior affidabilità dei dispositivi in concomitanza di una ridotta deformazione del reticolo nello strato di AlGaN [26] [27], o realizzando strati epitassiali di maggior qualità [28]. Tutti questi aspetti motivano la ricerca sugli InAlN/GaN HEMT, dove l'effetto piezoelettrico non è presente [29].

L'affidabilità di HEMT polarizzati in condizioni di canale chiuso ad alte tensioni gate-source può essere compromessa anche da elettroni iniettati dal gate nel GaN mediante tunneling assistito da trappole. Questi elettroni possono raggiungere energie elevate danneggiando la superficie, le interfacce e generando trappole. Infine aumentando eccessivamente il campo elettrico verticale, può avvenire il breakdown dello strato dell'AlGaN con la conseguente formazione di un cammino conduttivo tra gate e GaN. Anche in questo caso le misure di elettroluminescenza sono molto utili per individuare effetti di breakdown localizzati e valutare meccanismi di degradazione in condizioni di OFF-state.

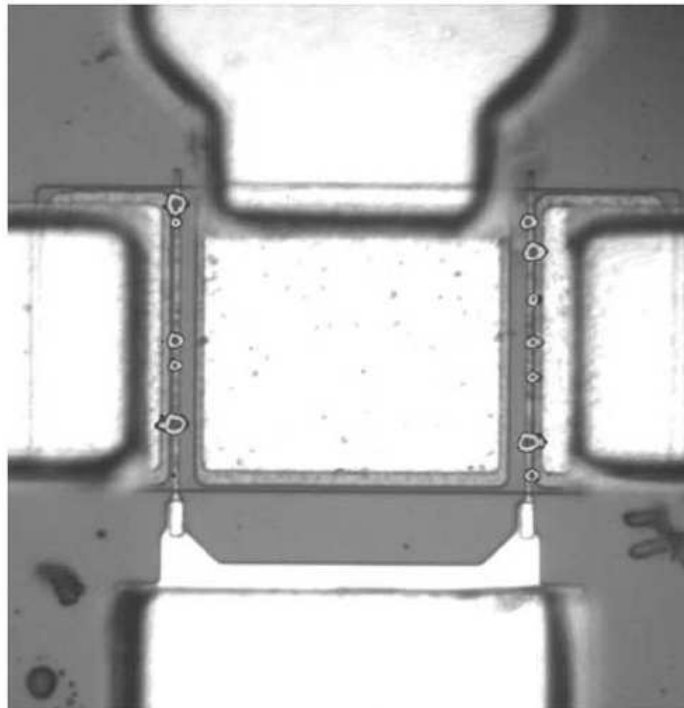


Figura 2.16: Immagini di elettroluminescenza (intensità in falsi colori) di un dispositivo HEMT polarizzato a $V_G = -35$ V, $V_D = V_S = 0$ V, tempo di emissione pari a 120 secondi.

Capitolo 3

Wafer e setup di misura

3.1 Dispositivi analizzati

I dispositivi analizzati in questo periodo di tesi sono HEMT su Nitruro di Gallio appartenenti ai wafer forniti da Selex ognuno dei quali presenta layout, geometrie e processi di crescita differenti.

3.1.1 Wafer Selex 35

In questa sezione sono riportate le caratteristiche principali del Wafer Selex 35 a disposizione:

- SLX 35

Wafer su substrato in carburo di silicio. Lo spessore dello strato di AlGa_N è 22nm. La percentuale di alluminio nell'AlGa_N è 25.5%. Il processo epitassiale è stato eseguito da 3-5 Labs e il substrato da Cree. Inoltre è presente uno strato di passivazione depositato sopra i dispositivi del wafer.

Nei dispositivi su wafer Selex il contatto di gate è realizzato in Ni/Au con spessori 40nm/300nm mentre quelli di drain e source in Ti/Al/Ni/Au con spessori 20nm/100nm/55nm/45nm.

3.1.2 Tipi di campioni studiati

Su ogni wafer o scheggia di wafer sono presenti un numero variabile di celle contenenti i vari dispositivi. Esistono due diversi tipi di celle: PCM (Figura 3.2) e celle standard (Figura 3.3). I dispositivi nelle due celle sono differenti, sono infatti destinati a usi diversi (le PCM hanno una funzione più di controllo su determinati parametri del wafer), e si distinguono in base al loro layout.

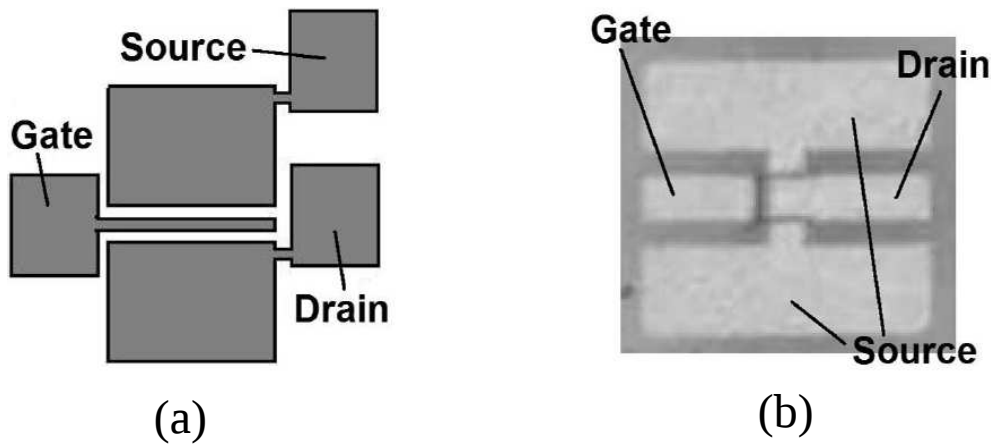


Figura 3.1: Dispositivo TLM (a) e dispositivo HEMT (b) con configurazione RF.

Il wafer preso in esame per questo lavoro è stato il SELEX-35 le cui principali caratteristiche sono riportate in tabella 3.1.

Wafer name	Substrate		Epilayer	AlGaN		GaN	Processing
	material	supplier		thickness (nm)	Al-content	thickness (μm)	
SLX_35	SiC	Cree	TRT	22	25.5%	1.5	Selex
Destination TLM data							
R _{contact} (Ω/mm)		s(Ω/sq.)		R _{sheet} (Ω /sq.)		s(Ω /sq.)	
0.31		0.03		396.0		24	
2x100μm DC parameters							
I _{DSS0} (mA/mm)		Std dev		gm (mS/mm)		Std dev	
783		54		284		15	
						Vp (V)	
						-3.15	
						Std dev	
						0.8	

Tabella 3.1: Caratteristiche del wafer Selex 35.

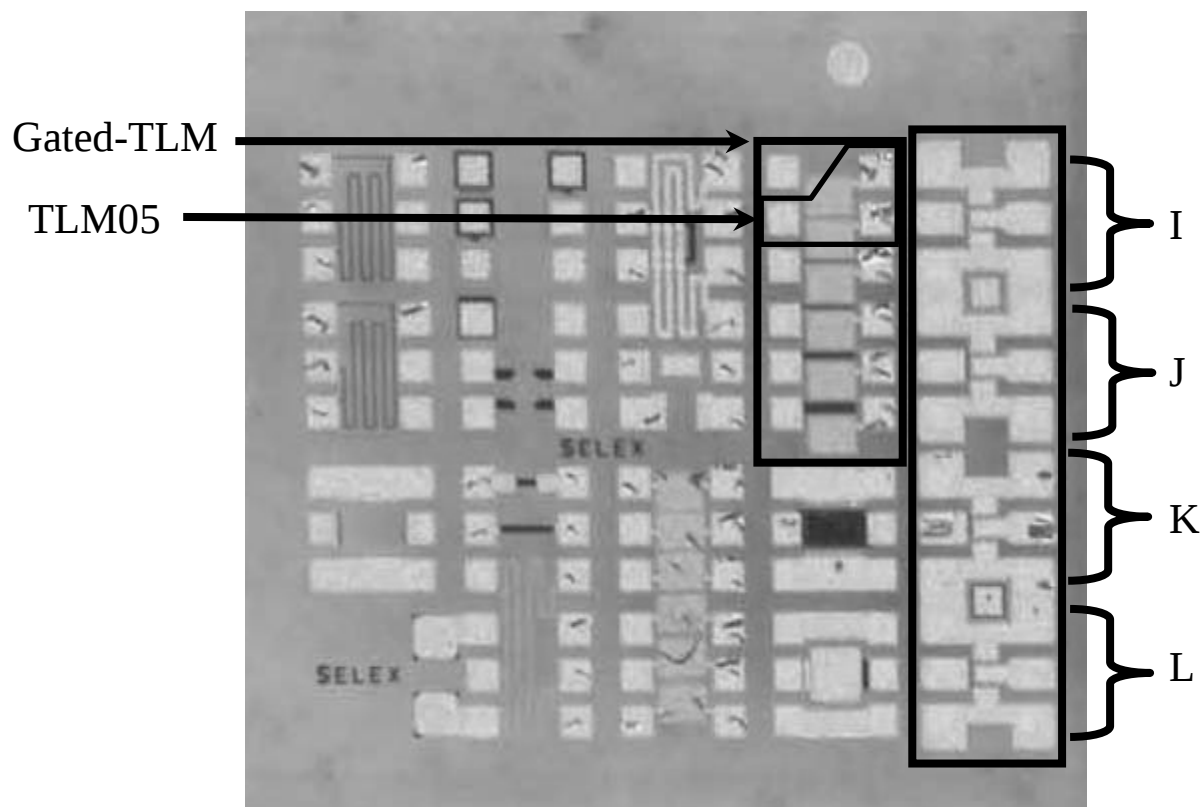


Figura 3.2: Cella PCM.

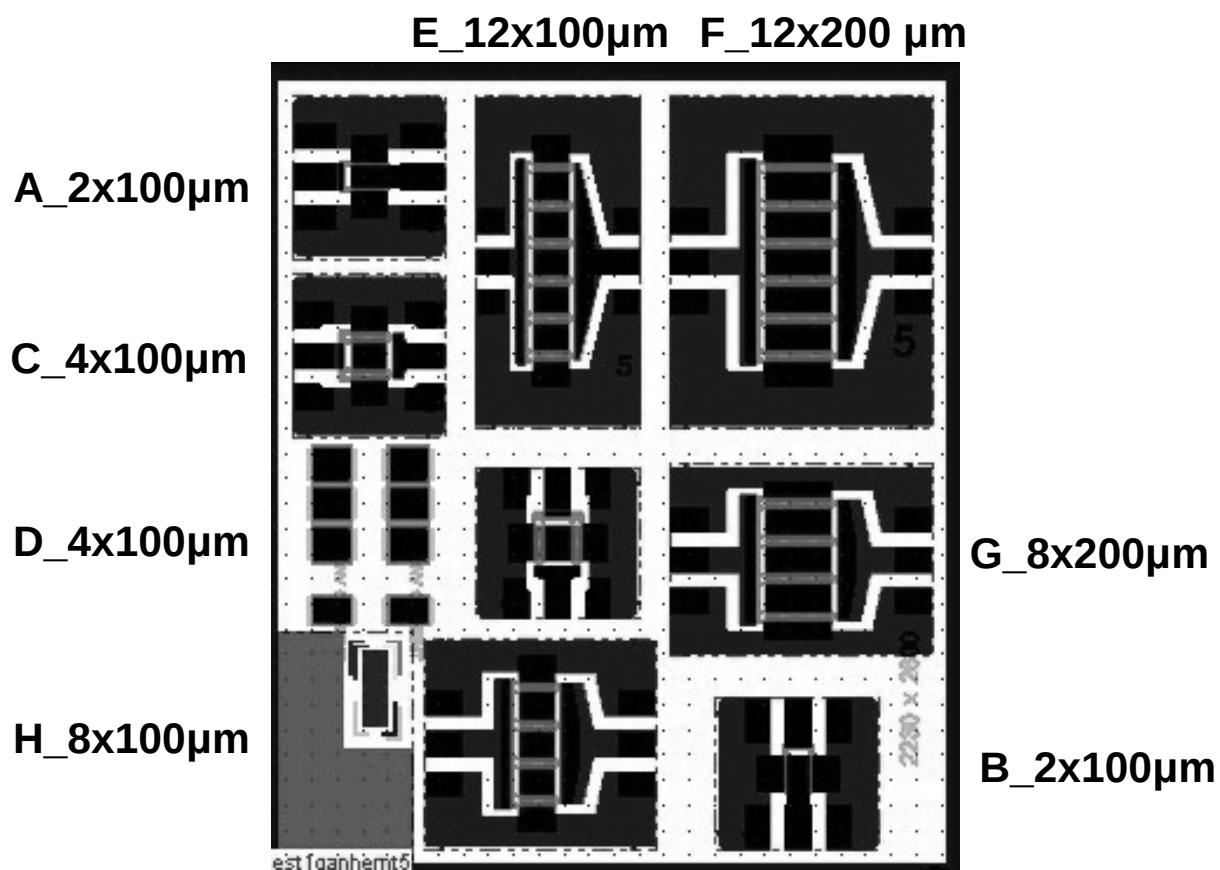


Figura 3.3: Cella standard con i diversi dispositivi e relativo numero di gate-finger.

	W_G [μm]	L_G [μm]	$L_{GS} = L_{GD}$ [μm]
TLM05	100	0.5	4.75
TLM5	100	5	5
TLM10	100	10	5
TLM20	100	20	5
TLM30	100	30	5

Tabella 3.2: Caratteristiche geometriche dei TLM.

3.2 Caratterizzazione DC

La caratterizzazione DC di un dispositivo consiste in una serie di misure atte a definire il suo stato, andandone a valutare i parametri più importanti.

Per misura DC si intende una serie di misure che osservano il comportamento statico del dispositivo. La configurazione per questo tipo di misura prevede l'utilizzo di una probe station Karl Suss (Figura 3.4) con 2 punte RF per contattare il dispositivo; una punta RF ha la forma di un tridente in cui il dente centrale va a contattare il gate o il drain dell'HEMT mentre i due denti laterali contattano il source che viene sempre messo a massa. Le punte RF sono montate su dei micromanipolatori che permettono lo spostamento lungo i tre assi dello spazio; con l'utilizzo di due cavi biassiali BNC si collegano le punte allo strumento di misura che in questo caso è un paramiter analyzer Agilent E5263A.

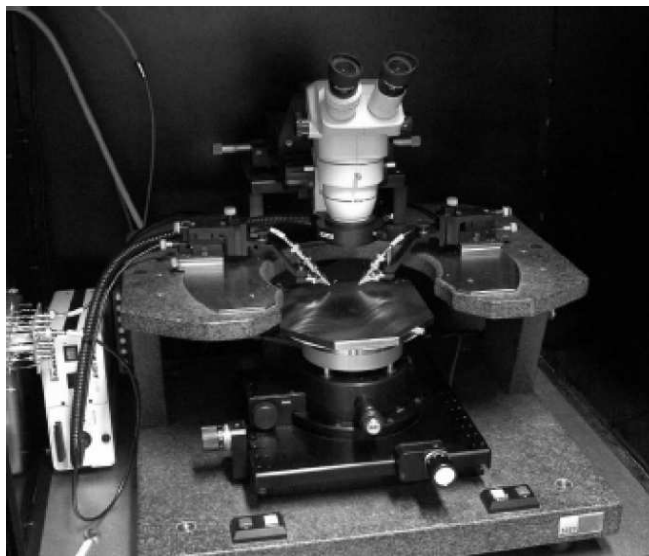


Figura 3.4: Probe station Karl Suss.

Il parameter analyzer possiede due SMU (Source Monitor Unit): la *E5290A High Speed High Power SMU* per connettere e misurare la corrente e tensione di drain e la *E5291A High Speed Medium Power SMU* per connettere e misurare la corrente e tensione di gate. Come già anticipato il source è connesso a massa dallo strumento. Una SMU permette di fornire tensione (corrente) continua o impulsata e misurare la corrispondente corrente (tensione). L'Agilent E5263A è connesso, tramite un cavo GP-IB, ad un PC dove un *virtual instrument (VI)*, creato in labview, controlla lo strumento. Il programma è in grado di fare sweep di tensione di drain per vari step di tensione di gate per eseguire le caratterizzazioni DC. Inoltre, con l'uso di un altro VI, è possibile comandare lo strumento affinché esegua una caratterizzazione DC, rimanga polarizzato per una certa durata di tempo su un punto di lavoro e poi esegua una nuova caratterizzazione DC; in questo modo si possono confrontare le caratteristiche prima e dopo uno stress.

3.3 Misure dinamiche

Per caratterizzare il fenomeno del *current collapse* si adotta una misura dinamica in cui il dispositivo è polarizzato su un punto di quiete (*base line*); quindi il gate e il drain sono impulsati in modo sincrono a tensioni diverse dalla *base line* e si misura la corrente istantanea di drain. Per capire meglio come viene effettuata questa misura si consideri il seguente esempio: il dispositivo è polarizzato nella *base line* ($V_G = -6 \text{ V}$, $V_D = 0 \text{ V}$); viene dato un impulso di gate a 0V e un impulso di drain a 0.2 V e si misura I_D . In seguito si continua a dare lo stesso impulso di gate e si sposta quello di drain ($V_D = 0.4 \text{ V}$) lungo tutta la caratteristica a passi di 0.2 V; è così possibile ricostruire tutta la caratteristica $I_D - V_D$ impulsata del dispositivo e confrontarla sia con la misura DC sia con la misura eseguita partendo da altre *base-line* (nel nostro caso le *base-line* adottate sono tre ($V_G = 0 \text{ V}$, $V_D = 0 \text{ V}$), ($V_G = -6 \text{ V}$, $V_D = 0 \text{ V}$), ($V_G = -6 \text{ V}$, $V_D = 10 \text{ V}$)). In un secondo momento si costruisce anche la misura $I_D - V_G$: si mantiene lo stesso impulso di drain e si va a cambiare l'impulso di gate che parte da valori bassi ($V_G = -6 \text{ V}$) e progressivamente apre il canale con impulsi sempre più vicini a 0V. I segnali di drain e gate, come si può vedere dalla Figura 3.5, sono treni di impulsi rettangolari con la stessa larghezza temporale (si definisce il periodo e il duty-cycle) ma con diversa ampiezza.

Un sistema di misura di questo tipo che utilizza due impulsi per fornire tensione ai terminali di gate e drain è detto *Double Pulse System* ed è stato creato per emulare il sistema di misurazione Dynamic IV Analyzer (DIVA) molto più costoso. Il vantaggio principale di una

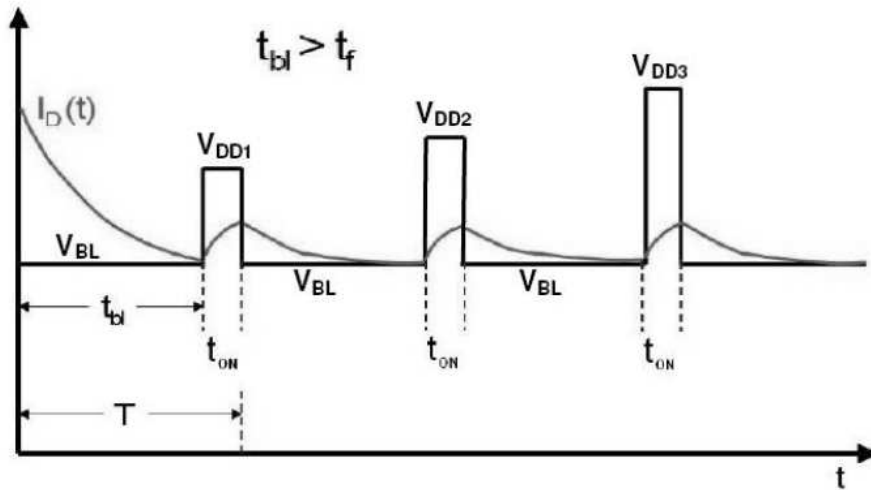


Figura 3.5: Andamento nel tempo della tensione V_{DD} e della corrente I_D .

misura eseguita con due impulsi è quello di poter polarizzare il dispositivo in punti di quiete (a canale strozzato e corrente di drain piccola) evitando surriscaldamenti che possono influenzare le caratteristiche.

3.3.1 Sistema di misura adottato

La misura viene eseguita in una probe station come descritto nel paragrafo 3.2. Si usano due impulsatori HP8110A, HP8114A e un oscilloscopio Tektronix TD654C collegati come mostrato in Figura 3.6. L'HEMT è collegato come amplificatore in classe A, cioè ha il source a massa e il drain è collegato all'alimentazione V_{DD} tramite una resistenza da 50. Il segnale di gate, fornito dall'impulsatore HP8110A, viene utilizzato come trigger per l'oscilloscopio e per il secondo impulsore HP8114A garantendo così una perfetta sincronizzazione tra gli strumenti. La tensione V_{DD} è fornita dall'impulsore HP8114A mentre l'oscilloscopio misura V_{GS} , V_{DD} e V_{DS} . Utilizzando questi dati è possibile ricavare la corrente I_D e la tensione sulla resistenza R_{LOAD} :

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_{LOAD}}$$

Tutti gli strumenti sono collegati tramite cavo GP-IB ad un PC che controlla la misura utilizzando un programma realizzato in LabView. Sono impostabili le *base line* il duty cycle

degli impulsi e il periodo di ripetizione. I dati vengono salvati e poi elaborati con un foglio elettronico.

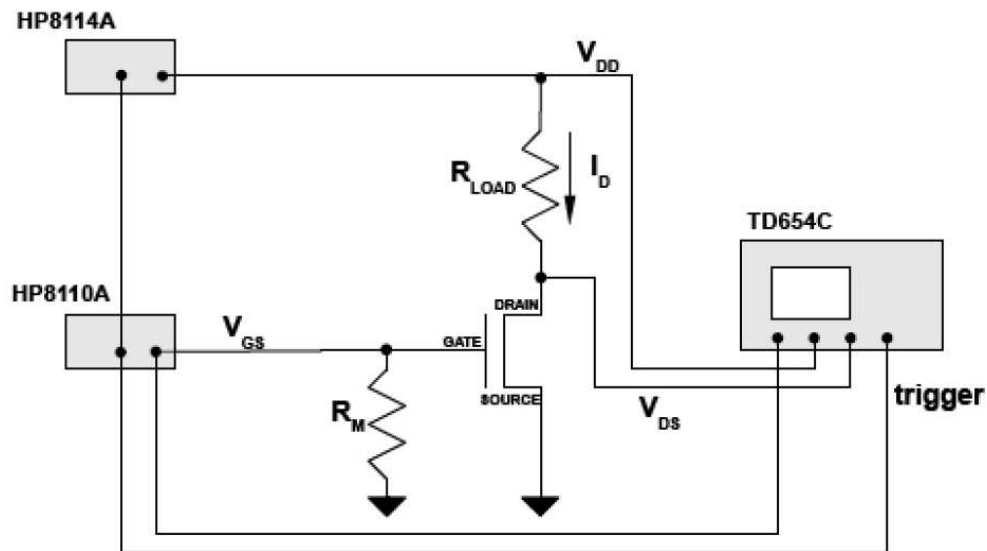


Figura 3.6: Sistema di misura double-pulse: R_M è una resistenza di adattamento.

3.4 Misure di elettroluminescenza

Le misure di emissione sono state eseguite durante gli step-stress di due ponendo il dispositivo all'interno di una probe station contenente un microscopio a emissione Hamamatsu Emission Microscopy System PHEMOS P200; questo è stato fatto con lo scopo di osservare l'emissione del dispositivo durante la misura. Il transistor in esame viene collegato, attraverso cavi BNC (all'interno della probe station) e triassiali (all'esterno della probe station), al parameter analyzer (HP4142) a sua volta connesso ad un PC con cavo GPIB. Lo strumento questa volta è comandato tramite il programma di gestione ICS che permette di eseguire sweep di tensione a step differenti e misure di stress nel tempo. Lo stress è stato eseguito polarizzando il diodo gate drain in inversa usando due punte DC. Una punta DC appare come un semplice ago montato su un manipolatore usato per contattare il pad del dispositivo.

Il microscopio del Phemos permette di scegliere tra quattro ingrandimenti: 5X, 20X, 50X, 100X con la possibilità di sostituire uno degli ingrandimenti con un oculare ad ingrandimento 10x. Può essere pilotato sia frontalmente sia via software, tramite un PC ad esso connesso (Figura 3.7). I dispositivi vengono polarizzati staticamente in diversi punti di lavoro per un

certo intervallo di tempo, utilizzando il parameter analyzer; il sensore ottico del PHEMOS conteggia i fotoni emessi dall'HEMT polarizzato ed in seguito, una volta spente le tensioni imposte, viene acquisita una figura di emissione di fondo (dark image) che il software provvede a sottrarre dall'immagine di emissione precedente. È possibile sovrapporre l'immagine di emissione con la fotografia del transistor, rendendo così immediatamente visibili le zone di maggiore emissione. È inoltre possibile ottenere il numero dei fotoni emessi nella zona attiva del dispositivo, sia in valore totale (integrati su tutta la superficie) che in valore massimo.

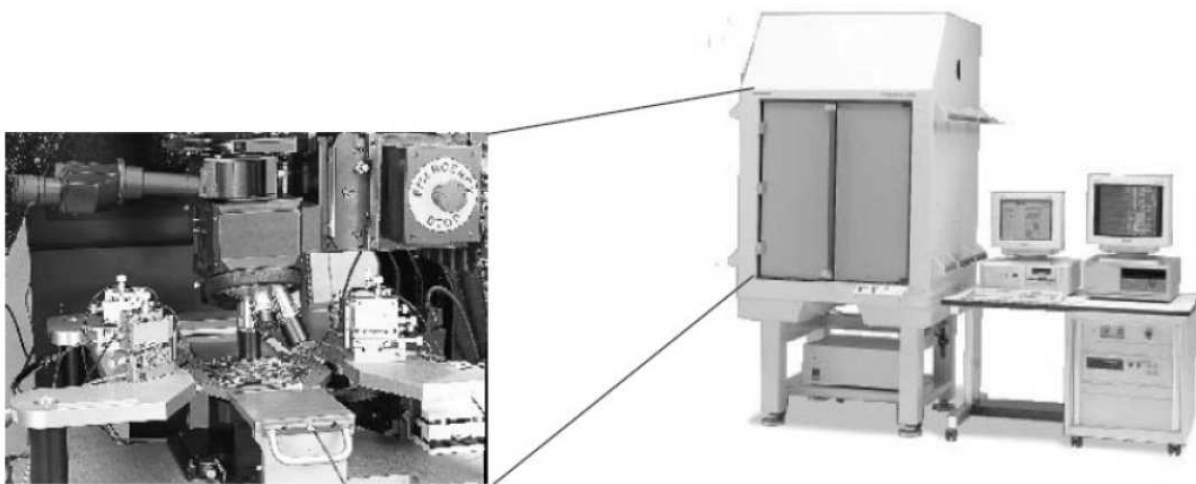


Figura 3.7: Microscopio ad emissione PheMos P200.

Capitolo 4

Caratterizzazione statica e dinamica

Questo capitolo ha lo scopo di descrivere le principali caratteristiche dei dispositivi sul wafer. Prima di eseguire stress o altre indagini sono state effettuate misure preliminari per avere un'indicazione di massima degli ordini di grandezza dei parametri tipici dei dispositivi. In particolare sono state eseguite caratteristiche DC dei transistor $2 \times 100 \mu\text{m}$ sul wafer Selex-35. Sono state eseguite, inoltre, caratteristiche impulsive solo su dispositivi $2 \times 100 \mu\text{m}$.

4.1 Misure DC

Nelle caratteristiche DC sono riportati i seguenti grafici:

- **Gate-Source Diode:** caratteristica I-V del diodo Schottky gate-source con V_{GS} che varia da -8 V a 2 V, a step di 0.01 V.
- **Out:** caratteristiche di corrente d'uscita per V_{DS} da 0 V a 10 V con V_{GS} che aumenta da -6 V ($< V_{TH}$) a 0 V a step di 1 V.
- **I_D - V_{GS} in zona lineare:** caratteristica di trasferimento con V_{DS} da 0.1 V a 1 V, step 0.3 V; in questo grafico è riportata anche la corrente di leakage I_G in scala logaritmica.
- **g_m in zona lineare:** transconduttanza funzione di V_{GS} con V_{DS} da 0.1 V a 1 V, step 0.3 V.
- **I_D - V_{GS} in zona lineare:** caratteristica di trasferimento con V_{DS} da 1 V a 5 V, step 1 V; in questo grafico è riportata anche la corrente di leakage I_G in scala logaritmica.
- **g_m in zona lineare:** transconduttanza funzione di V_{GS} con V_{DS} da 1 V a 5 V, step 1 V.

- **I_D - V_{GS} in zona di saturazione:** caratteristica di trasferimento con V_{DS} da 6 V a 10 V, step 2 V; in questo grafico è riportata anche la corrente di leakage I_G in scala logaritmica.
- **g_m in zona di saturazione:** transconduttanza funzione di V_{GS} con V_{DS} da 6 V a 10 V, step 2 V.

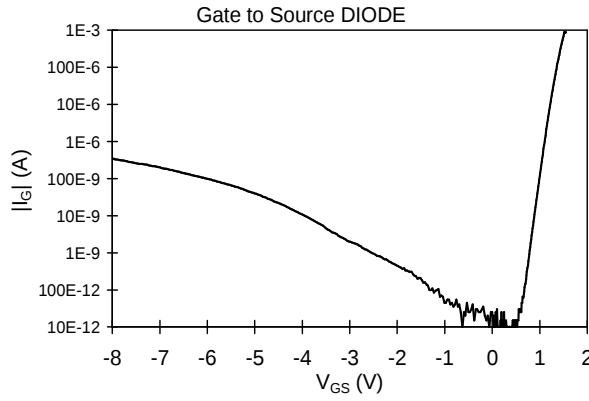
Dai grafici elencati è possibile estrapolare alcuni parametri che caratterizzano il dispositivo:

- **I_{Dsat_4} :** corrente di drain misurata per $V_{DS} = 4$ V e $V_{GS} = 0$ V
- **I_{Dsat_10} :** corrente di drain misurata per $V_{DS} = 10$ V e $V_{GS} = 0$ V
- **g_{m1_MAX} :** massimo della transconduttanza g_{m1} misurata a $V_{DS} = 0.1$ V (g_{m1} è la transconduttanza funzione di V_{GS} con V_{DS} che va da 0.1 V a 1 V a passi di 0.3 V).
- **g_{m3_MAX} :** massimo della transconduttanza g_{m3} misurata a $V_{DS} = 10$ V (g_{m3} è la transconduttanza funzione di V_{GS} con V_{DS} che va da 6 V a 10 V a passi di 2 V).
- **$I_{G_leakageON}$:** corrente di gate misurata per $V_{DS} = 10$ V e $V_{GS} = 0$ V .
- **$I_{G_leakageOFF}$:** corrente di gate misurata per $V_{DS} = 10$ V e $V_{GS} = -6$ V .
- **V_{TH} :** soglia del dispositivo misurata sulla caratteristica $I_D - V_G$ a $V_D = 10$ V .
- **I_{GS_diode} :** corrente del diodo gate-source per $V_{GS} = -8$ V.

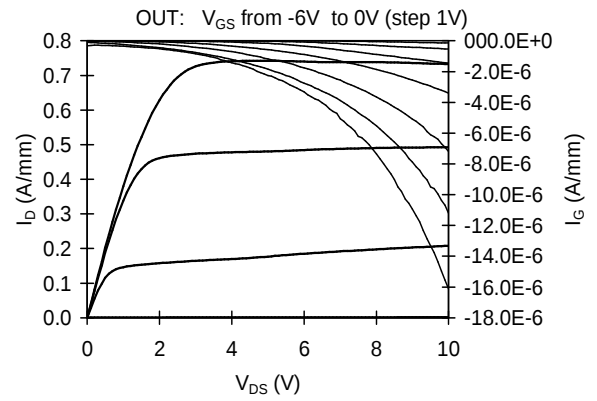
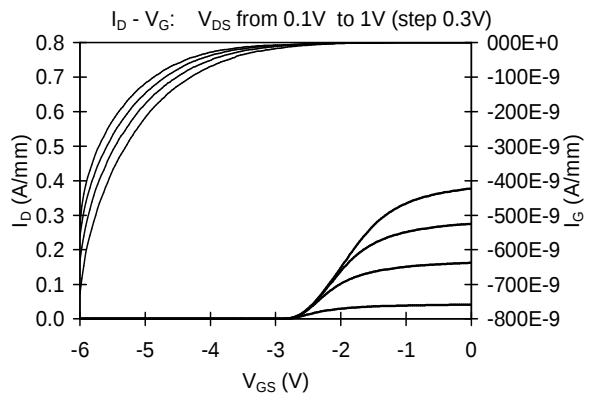
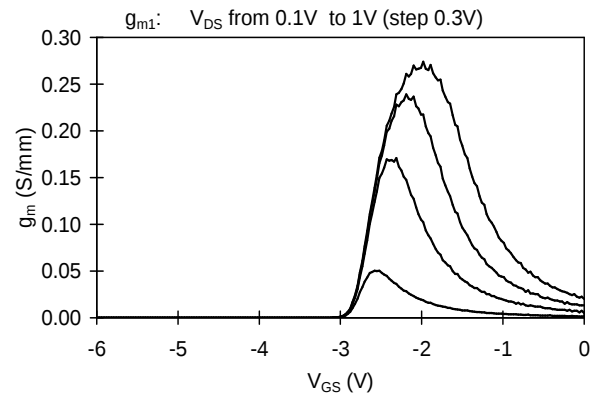
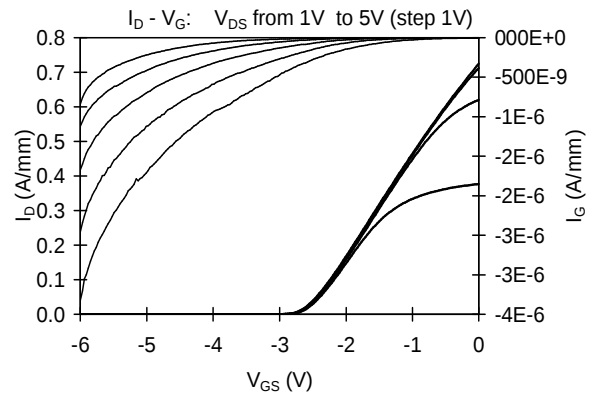
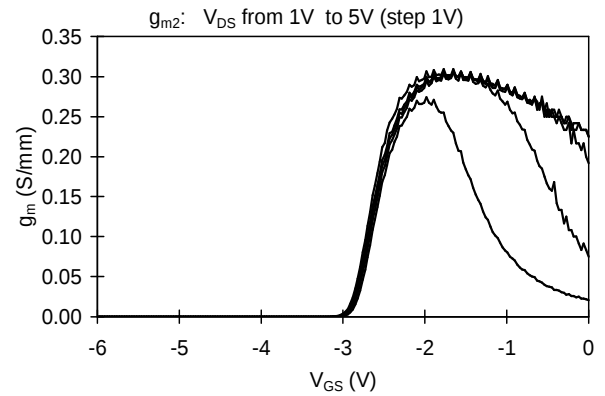
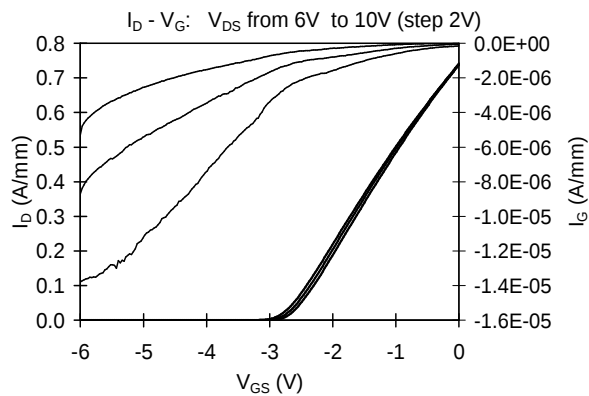
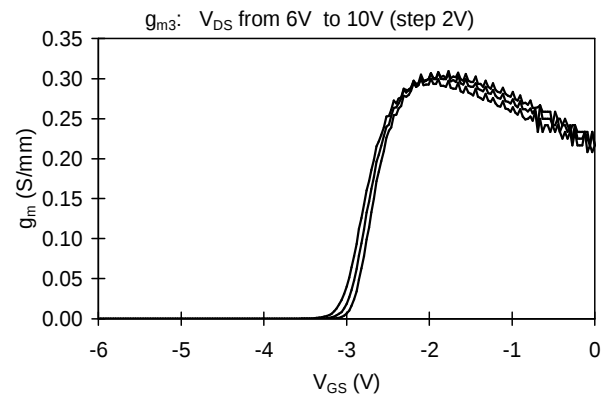
Vengono riportate di seguito alcune misure eseguite su dispositivi tipici. Come si può vedere i dispositivi non sono soggetti a kink; questo fenomeno sarebbe dovuto a trappole nello strato buffer di GaN che intrappolano carica, riducono i portatori presenti nel canale e abbassano quindi la corrente I_D . In tabella 4.1 sono elencati valori mediati su 10 campioni, con rispettiva deviazione standard, dei parametri caratteristici per il wafer Selex-35.

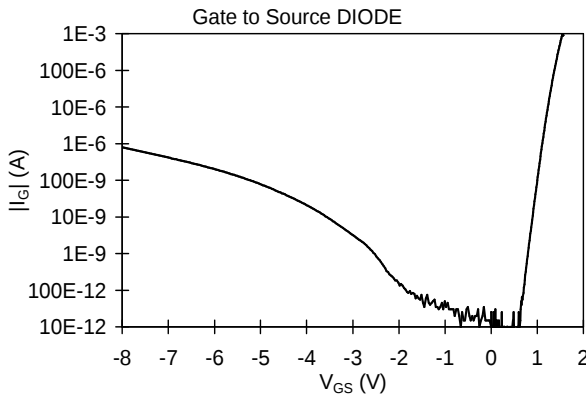
I_{Dsat4}	I_{Dsat10}	g_{m1MAX}	g_{m3MAX}	I_{G_LEAKON}	$I_{G_LEAKOFF}$	$V_{TH_VDS=10V}$	I_{GS_diode}
(A/mm)	(A/mm)	(S/mm)	(S/mm)	(A/mm)	(A/mm)	(V)	(A)
721.18E-3	720.79E-3	48.99E-3	290.77E-3	-228.031E-9	-19.090E-6	-2.829E+0	1.005E-6
$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
0.093223	0.093960	0.007995	0.029508	1.562E-07	0.0000167	0.493235	1.582E-06

Tabella 4.1: Parametri caratteristici di HEMT con 2 gate-finger ($W_G = 200$ μ m, $L_G = 0.5$ μ m)

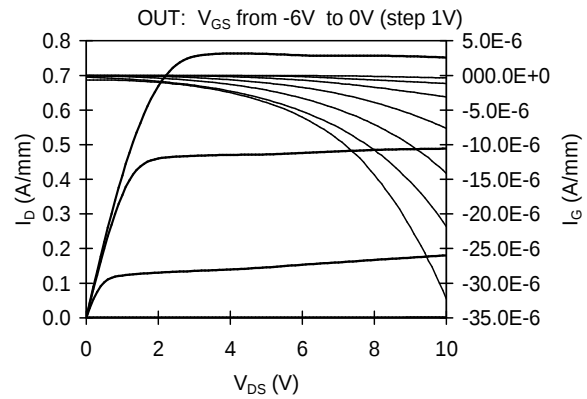
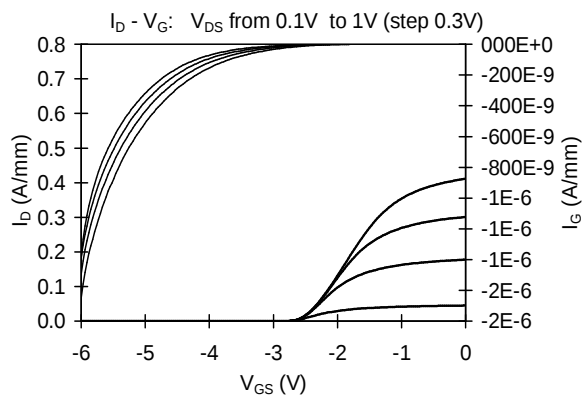
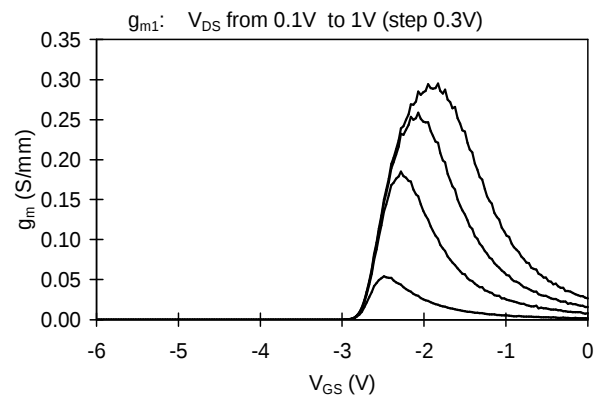
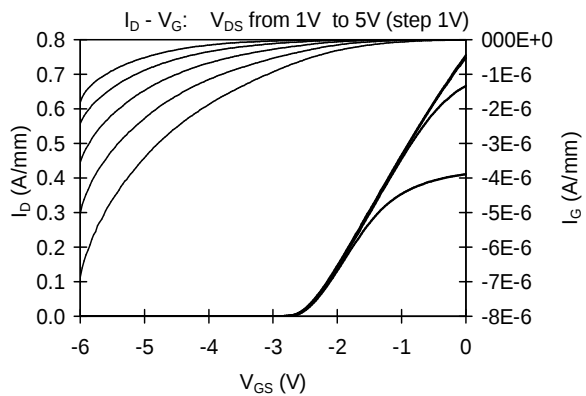
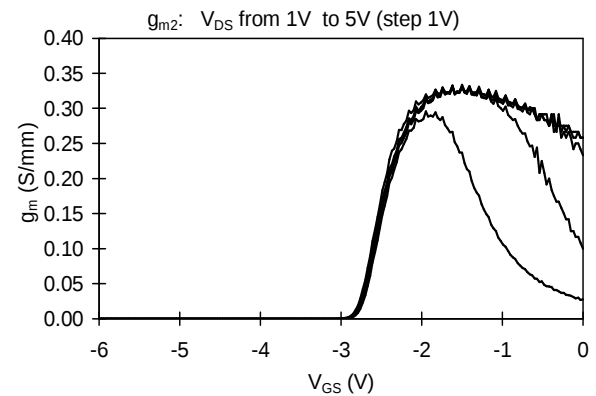
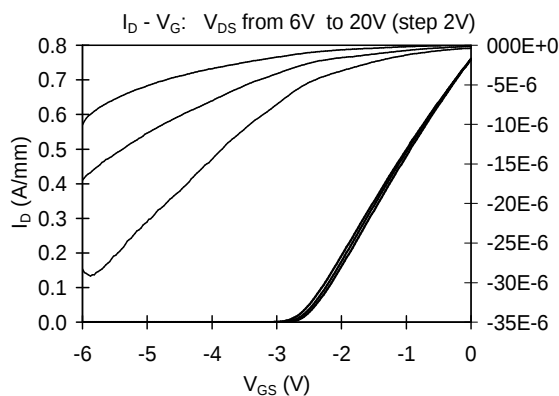
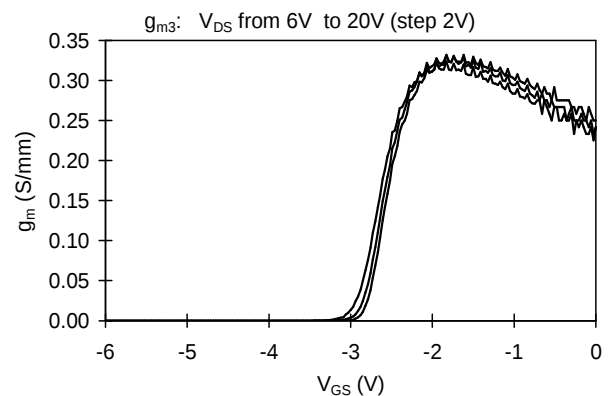


(a) caratteristica I-V del diodo gate-source.

(b) caratteristica $I_{DS} - V_{DS}$ con V_{GS} da -6 V a 0 V.(c) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ con V_{DS} da 0.1 V a 1 V.(d) caratteristica $g_m - V_{GS}$ con V_{DS} da 0.1 V a 1 V.(e) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ con V_{DS} da 1 V a 5 V.(f) caratteristica $g_m - V_{GS}$ con V_{DS} da 1 V a 5 V.(g) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ con V_{DS} da 6 V a 10 V.(h) caratteristica $g_m - V_{GS}$ con V_{DS} da 6 V a 10 V.**Figura 4.1:** Misure DC su SELEX-35 X - 5A ($W_G = 200 \mu\text{m}$, $L_G = 0.5 \mu\text{m}$)



(a) caratteristica I-V del diodo gate-source.

(b) caratteristica $I_{DS} - V_{DS}$ con V_{GS} da -6 V a 0 V..(c) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ con V_{DS} da 0.1 V a 1 V.(d) caratteristica $g_m - V_{GS}$ con V_{DS} da 0.1 V a 1 V.(e) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ con V_{DS} da 1 V a 5 V.(f) caratteristica $g_m - V_{GS}$ con V_{DS} da 1 V a 5 V.(g) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ con V_{DS} da 6 V a 10 V.(h) caratteristica $g_m - V_{GS}$ con V_{DS} da 6 V a 10 V.**Figura 4.2:** Misure DC su SELEX-35 Y – 4C ($W_G = 200 \mu\text{m}$, $L_G = 0.5 \mu\text{m}$)

4.2 Misure dinamiche su dispositivi 2x100 μm

Sono state eseguite misure dinamiche su dispositivi 2x100 μm per osservare l'entità dell'intrappolamento di carica nei wafer in questione.

Nelle caratteristiche dinamiche sono riportati i seguenti grafici:

- $I_{DS} - V_{DS}$: caratteristiche della corrente di uscita per V_{DS} da 0 V a 10 V con V_{GS} che cresce da -6 V ($< V_{TH}$) a 0 V a step di 1 V.
- $I_{DS} - V_{GS}$: trans-caratteristica eseguita a $V_{DS} = 5$ V e per V_{GS} che va da -6 V a 0 V.

Ogni grafico viene replicato tre volte poiché la misura, come spiegato nel paragrafo 3.3, viene fatta con tre base line diverse:

- Base Line ($V_G = 0$ V , $V_D = 0$ V) $\leftarrow$ (in blu nei grafici)
- Base Line ($V_G = -6$ V , $V_D = 0$ V) $\leftarrow$ (in verde nei grafici)
- Base Line ($V_G = -6$ V , $V_D = 10$ V) $\leftarrow$ (in rosso nei grafici)

Dai dati ottenuti è possibile ottenere i grafici delle g_m (transconduttanza misurata con V_{GS} da -6 V a 0 V e $V_{DS} = 5$ V) e il valore dello *slump ratio* (S.R.) definito come segue:

$$S.R. = \frac{I_{DS0_BL(-6,10)}}{I_{DS0_BL(0,0)}}$$

dove con I_{DS0} si intende I_{DS} a $V_{GS} = 1$ V , $V_{DS} = 5$ V .

È evidente che lo S.R. è indice di quanto buone siano le caratteristiche dinamiche dell'HEMT: lo S.R. si avvicina ad uno quando la corrente nella condizione di massimo intrappolamento (Base Line -6 V, 10 V) cala di poco rispetto alla corrente di minimo intrappolamento di carica (Base Line 0 V, 0 V) mentre si avvicina a zero quando il dispositivo si accende con lentezza a causa delle trappole superficiali. Per caratterizzare i dispositivi sono state eseguite misure al double pulse system su alcuni campioni del wafer.

Gli alti valori di S.R. ricavati sono indice di una buona deposizione dello strato passivante che minimizza gli stati trappola superficiali; si riduce così l'intrappolamento superficiale responsabile del collasso di corrente dovuto al ritardo di formazione del canale in seguito alla

sollecitazione impulsiva del gate. Sono riportati di seguito, solo a titolo esplicativo, i grafici ottenuti per tre dispositivi HEMT.

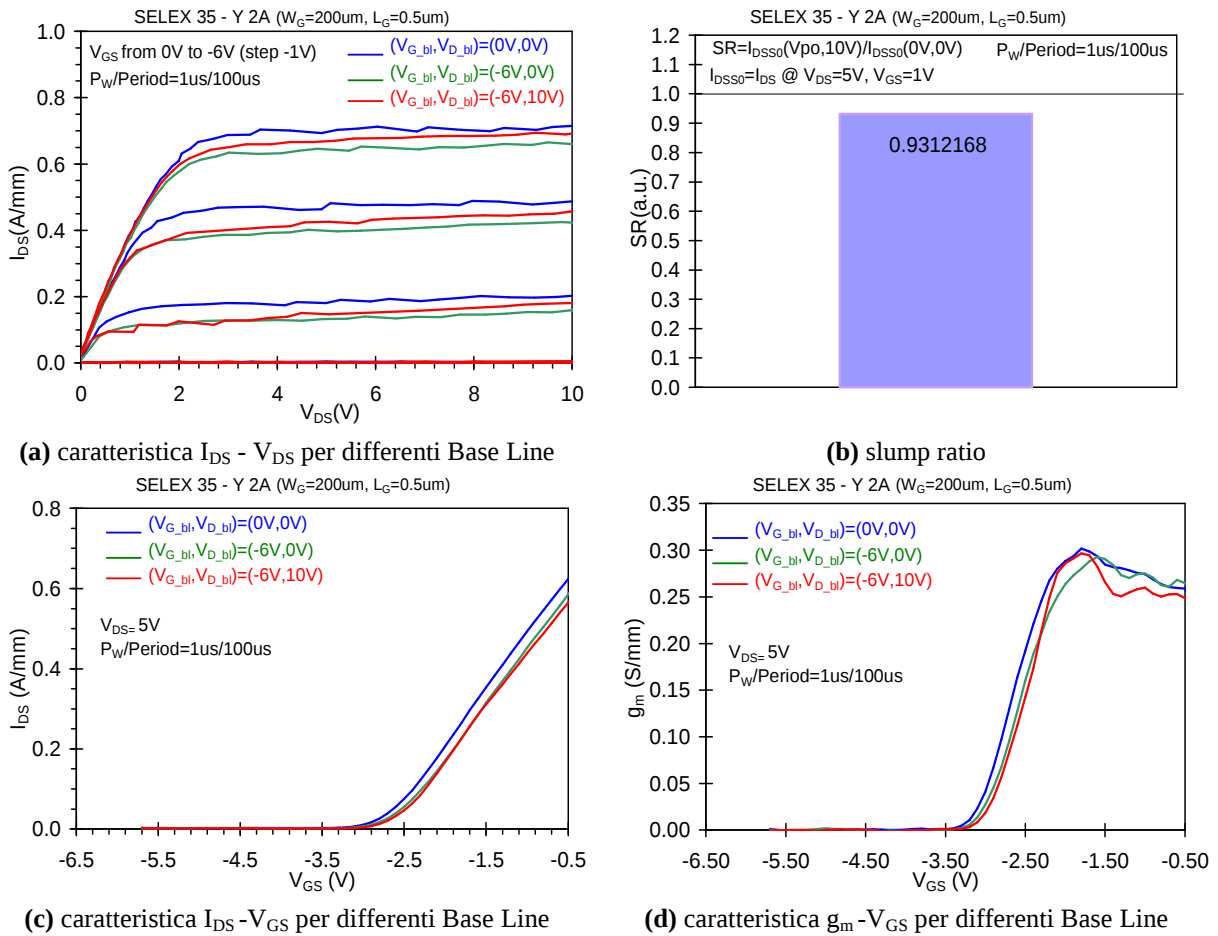
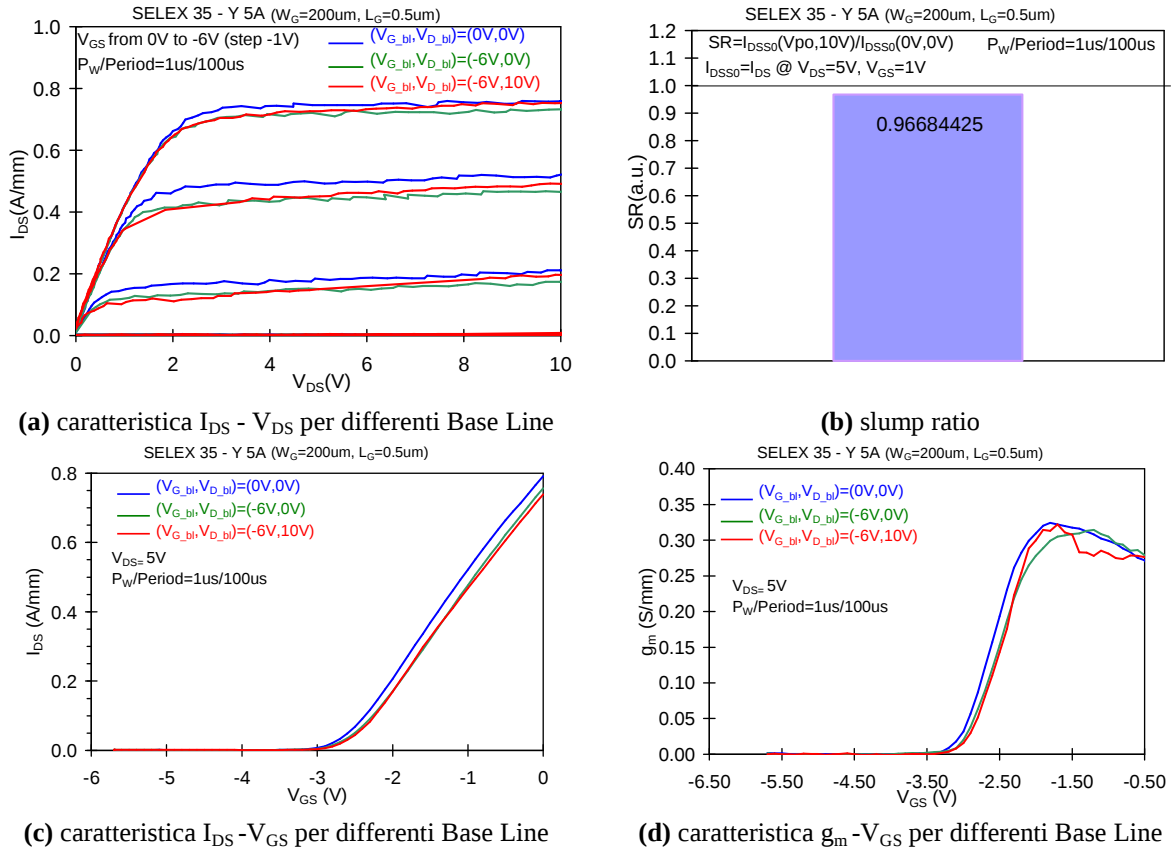
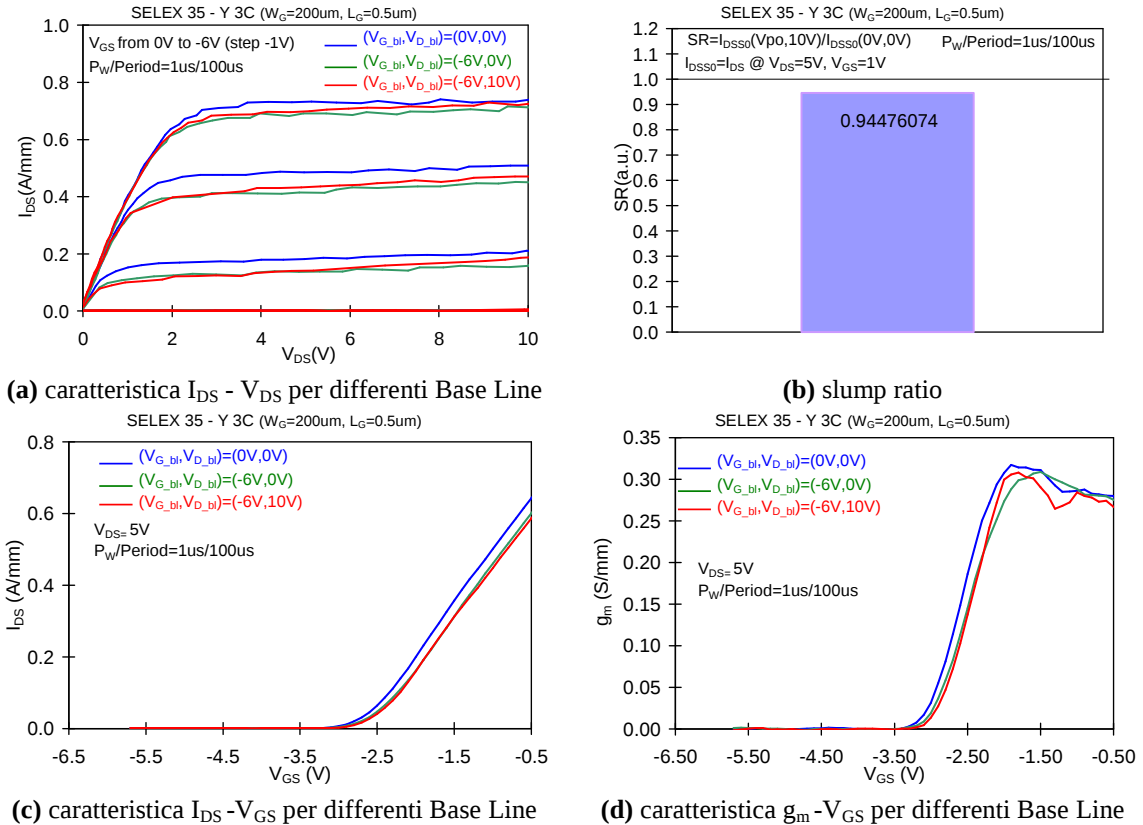


Figura 4.3: Misure Double Pulse su SELEX-35 Y - 2A ($W_G = 200 \mu m$, $L_G = 0.5 \mu m$)

**Figura 4.4:** Misure Double Pulse su SELEX-35 Y - 5A ($W_G = 200 \mu m$, $L_G = 0.5 \mu m$)**Figura 4.5:** Misure Double Pulse su SELEX-35 Y – 3C ($W_G = 200 \mu m$, $L_G = 0.5 \mu m$)

Capitolo 5

Misure di affidabilità

Per verificare l'affidabilità dei dispositivi presi in esame sono state effettuate delle misure con le quali si sottoponeva il campione ad elevate tensioni o correnti. In particolare è stato effettuato prima lo *step stress* in tensione e poi lo *step stress* in corrente. Si analizza inizialmente lo *step stress* in tensione attuato con il sistema di misura precedentemente descritto nel paragrafo 3.4.

5.1 Step Stress in tensione

Lo step-stress è un particolare metodo utilizzato per provocare un invecchiamento accelerato dei componenti. Il dispositivo viene polarizzato a tensioni via via crescenti per intervalli di tempi regolari. Nella nostra versione lo step-stress è realizzato applicando al gate tensioni negative (“OFF state”) crescenti in modulo a partire da 10 V fino ad un massimo di 100 V (il massimo di tensione applicata in realtà è variata da wafer a wafer in base alla sua robustezza) con passi di 5 V, mantenendo source e drain a massa. La durata di ogni step è stata fissata a $t_{\text{step}} = 120$ sec. In questo modo si portano i diodi gate-drain e gate-source in condizioni di polarizzazione inverse sempre più degradanti e si possono valutare gli effetti di degrado associati agli alti campi elettrici. Per ogni passo di stress sono state acquisite con il phemos le emissioni nelle tre condizioni di seguito descritte:

- **Stress:** durante lo stress; tempo di esposizione 120 s, $V_G = \text{var}$, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.
- **ON:** canale aperto; tempo di esposizione 5 s, $V_G = 0$ V, $V_D = 10$ V, $V_S = 0$ V.
- **OFF:** canale chiuso; tempo di esposizione 240 s, $V_G = -1$ V, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.

È stata fatta anche la caratterizzazione DC completa sul dispositivo vergine e dopo ogni passo di stress.

Sono stati sottoposti a questo stress alcuni dispositivi HEMT. Tutte le immagini riportate nel seguito sono state prese al phemos con un ingrandimento 50X e sono presentate in modo da avere sempre il source nella parte sopra e il drain nella parte sotto dell'immagine.

In figura 5.1 e 5.2 sono riportati i confronti tra le caratteristiche DC del dispositivo vergine e le caratteristiche DC del dispositivo dopo l'ultimo passo di stress per verificare il degrado complessivo avvenuto dopo l'intero *step stress*.

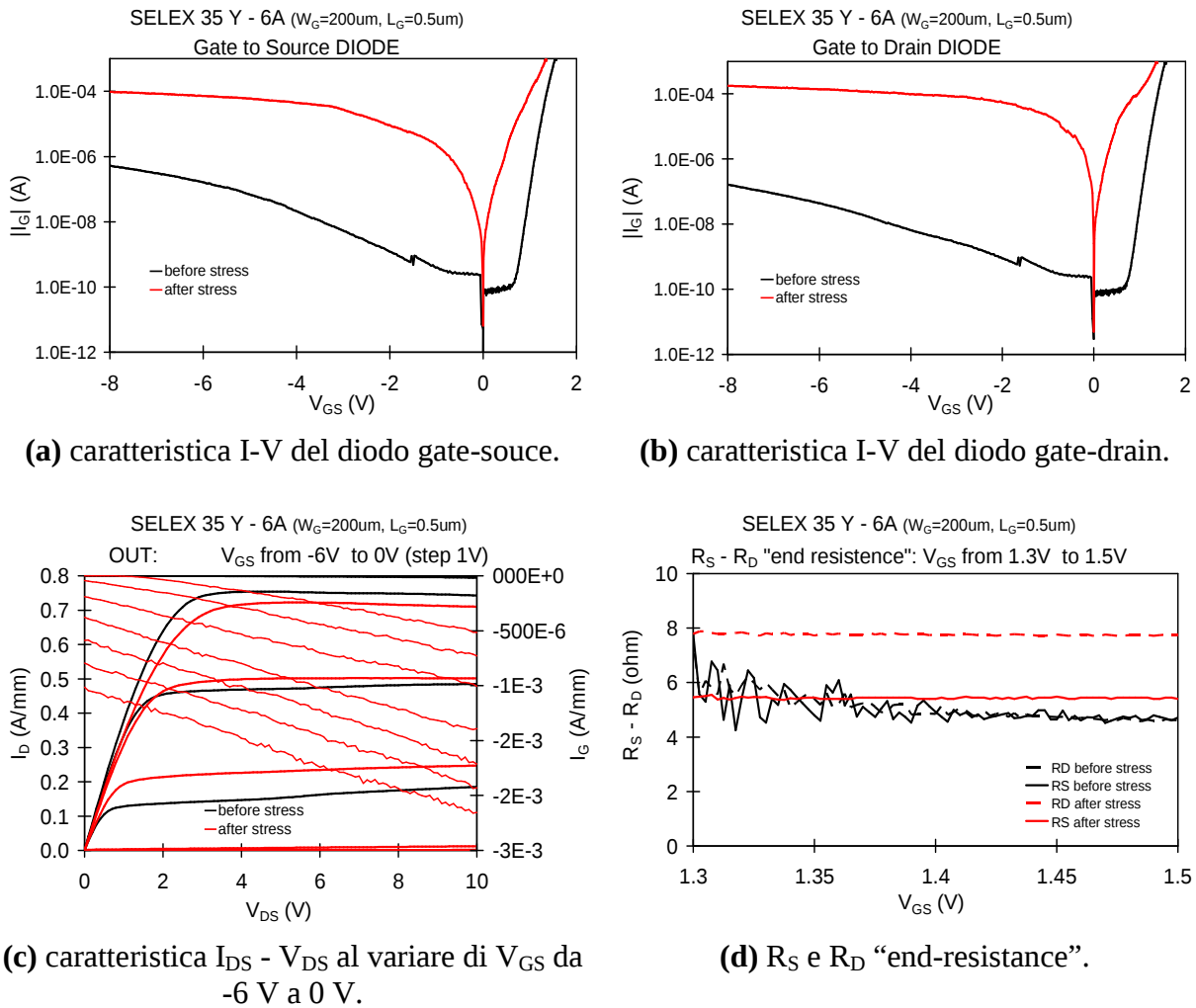
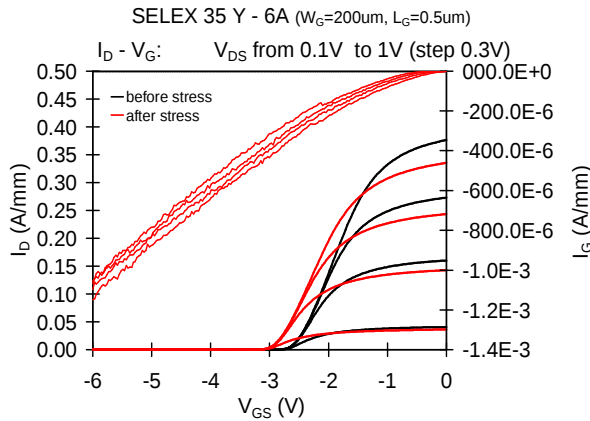
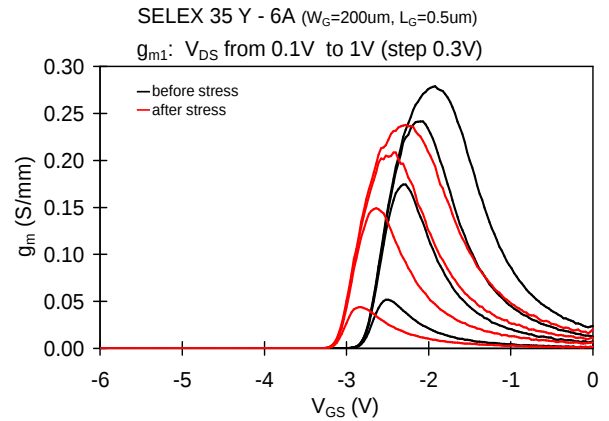


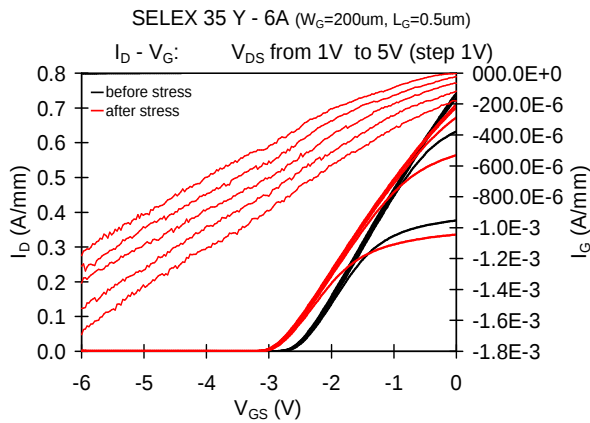
Figura 5.1: Misure DC su SELEX-35 Y – 6A prima e dopo lo *step stress* in tensione.



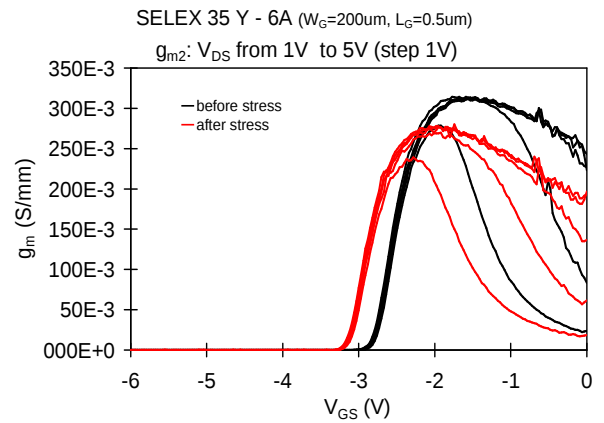
(a) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



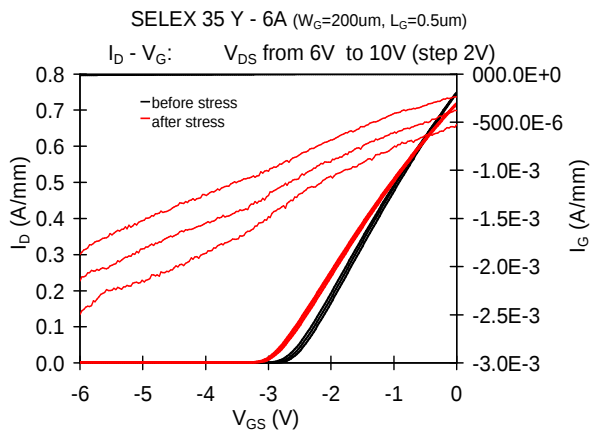
(b) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



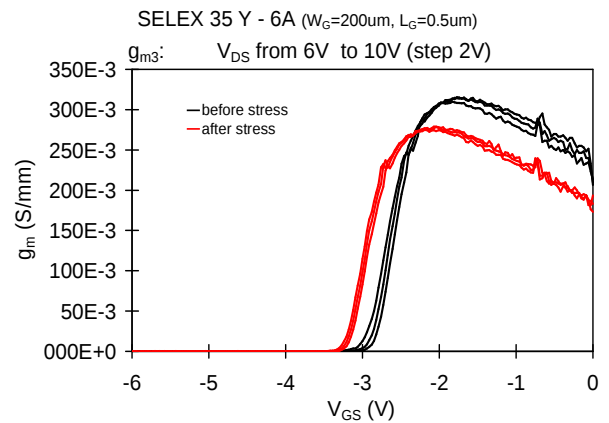
(c) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



(d) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



(e) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.



(f) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.

Figura 5.2: Misure DC su SELEX-35 Y – 6A prima e dopo lo *step stress* in tensione.

In figura 5.3 e 5.4 sono riportate le variazioni dei principali parametri DC durante ogni passo dello *step stress*.

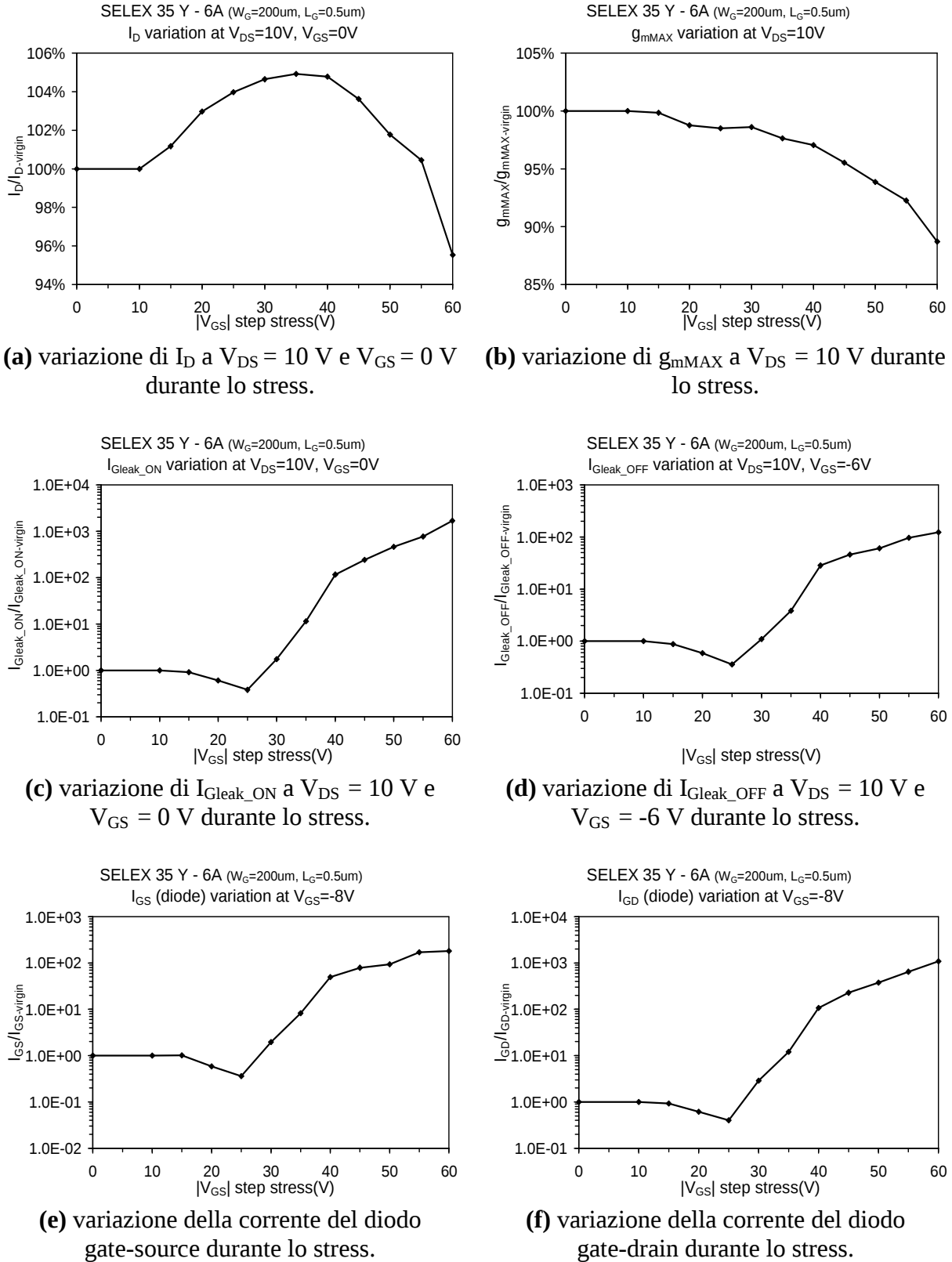


Figura 5.3: Variazioni parametri DC su SELEX-35 Y – 6A durante lo *step stress* in tensione.

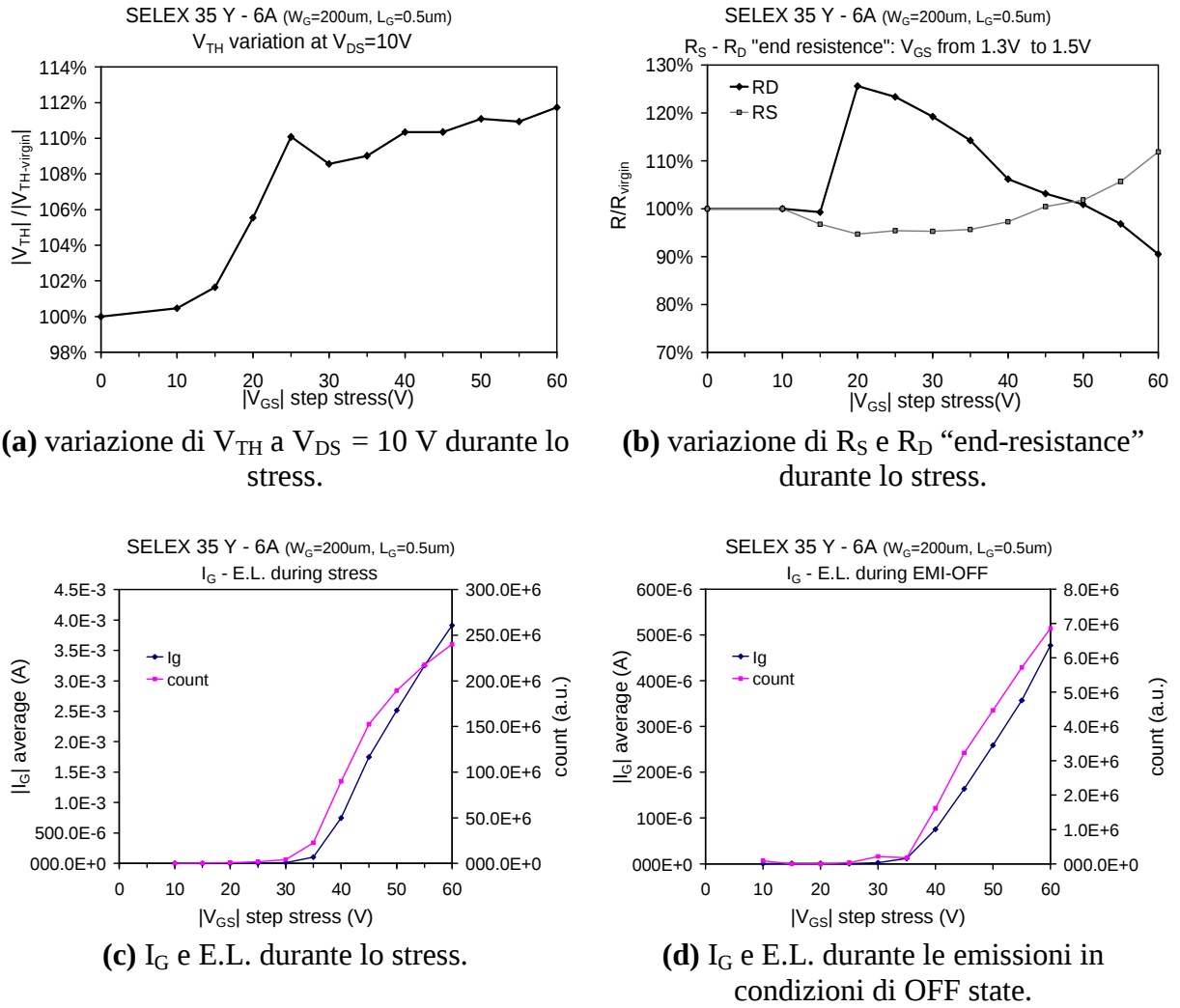


Figura 5.4: Variazioni parametri DC su SELEX-35 Y – 6A durante lo *step stress* in tensione.

Infine in Figura 5.5, 5.6 e 5.7 si riportano le immagini di emissioni rispettivamente nelle condizioni di:

- **ON:** canale aperto; tempo di esposizione 5 s, $V_G = 0$ V, $V_{DS} = 10$ V, $V_S = 0$ V.
- **OFF:** canale chiuso; tempo di esposizione 240 s, $V_{GS} = -10$ V, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.
- **Stress:** durante lo stress; tempo di esposizione 120 s, $V_{GS} = -10$ V fino a -60 V (con lo step di -10 V), $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.

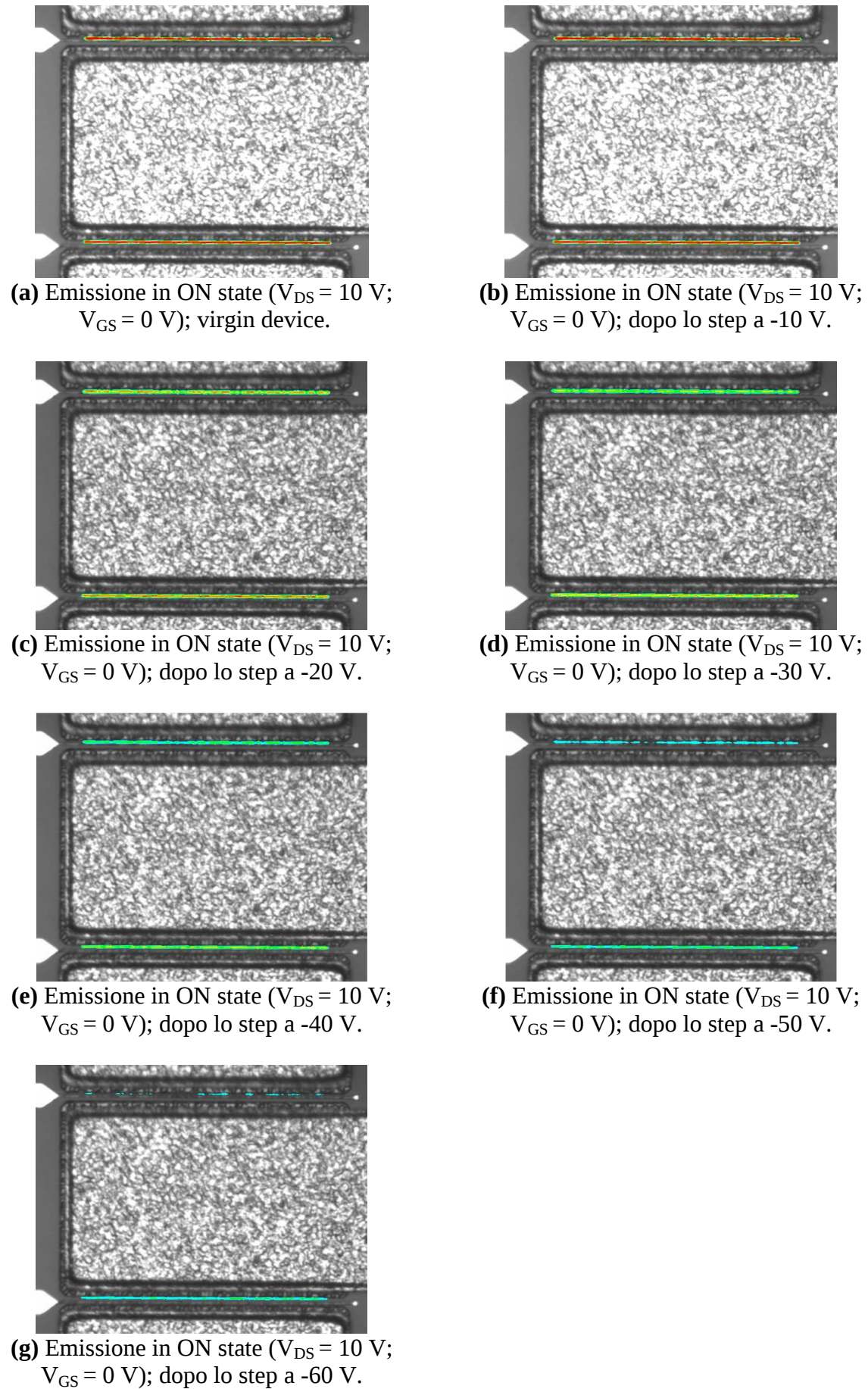


Figura 5.5: Emissioni in “ON state” su Y – 6A nel corso dello *step stress* in tensione.

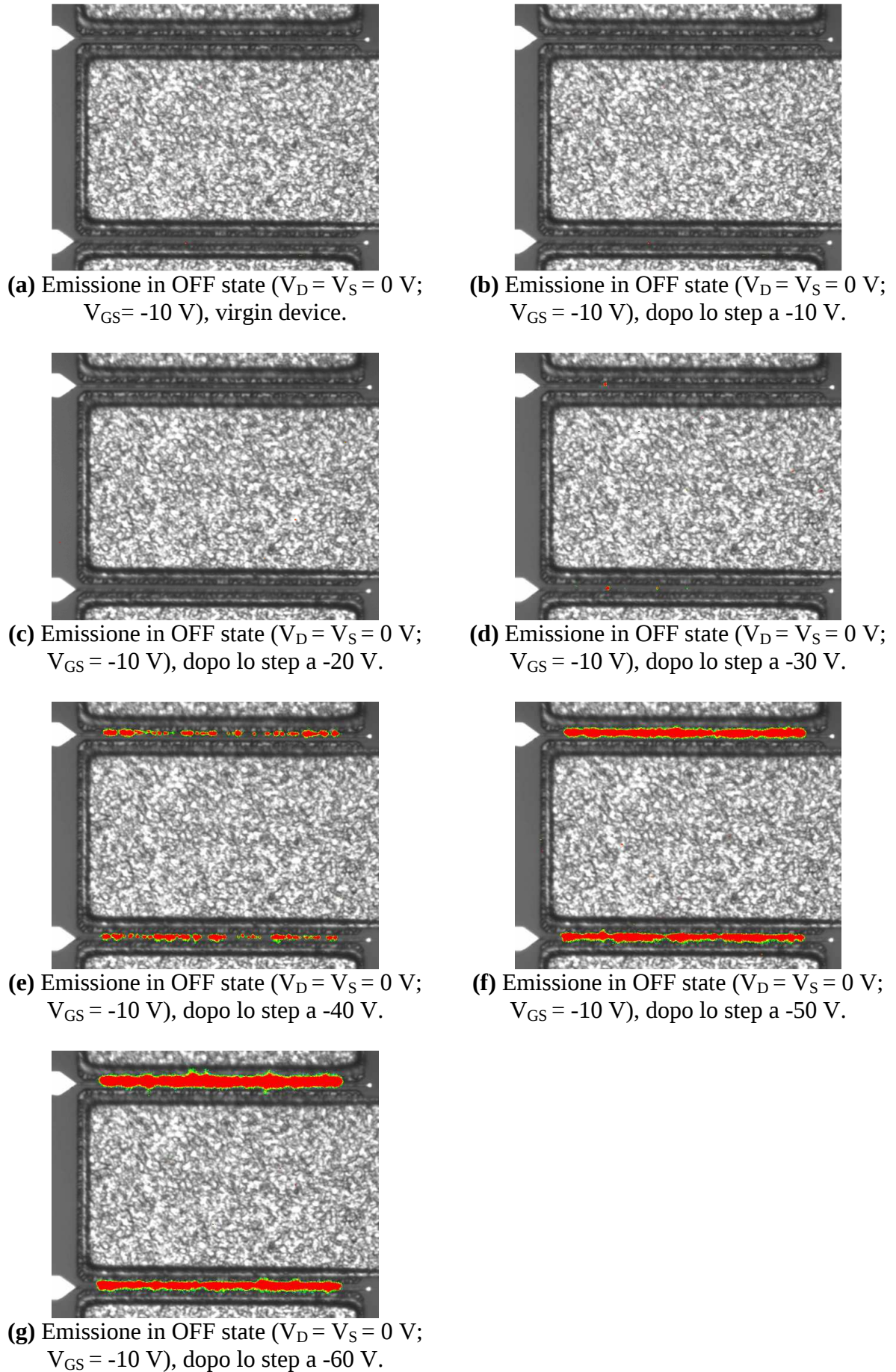


Figura 5.6: Emissioni in “OFF state” su Y – 6A nel corso dello *step stress* in tensione.

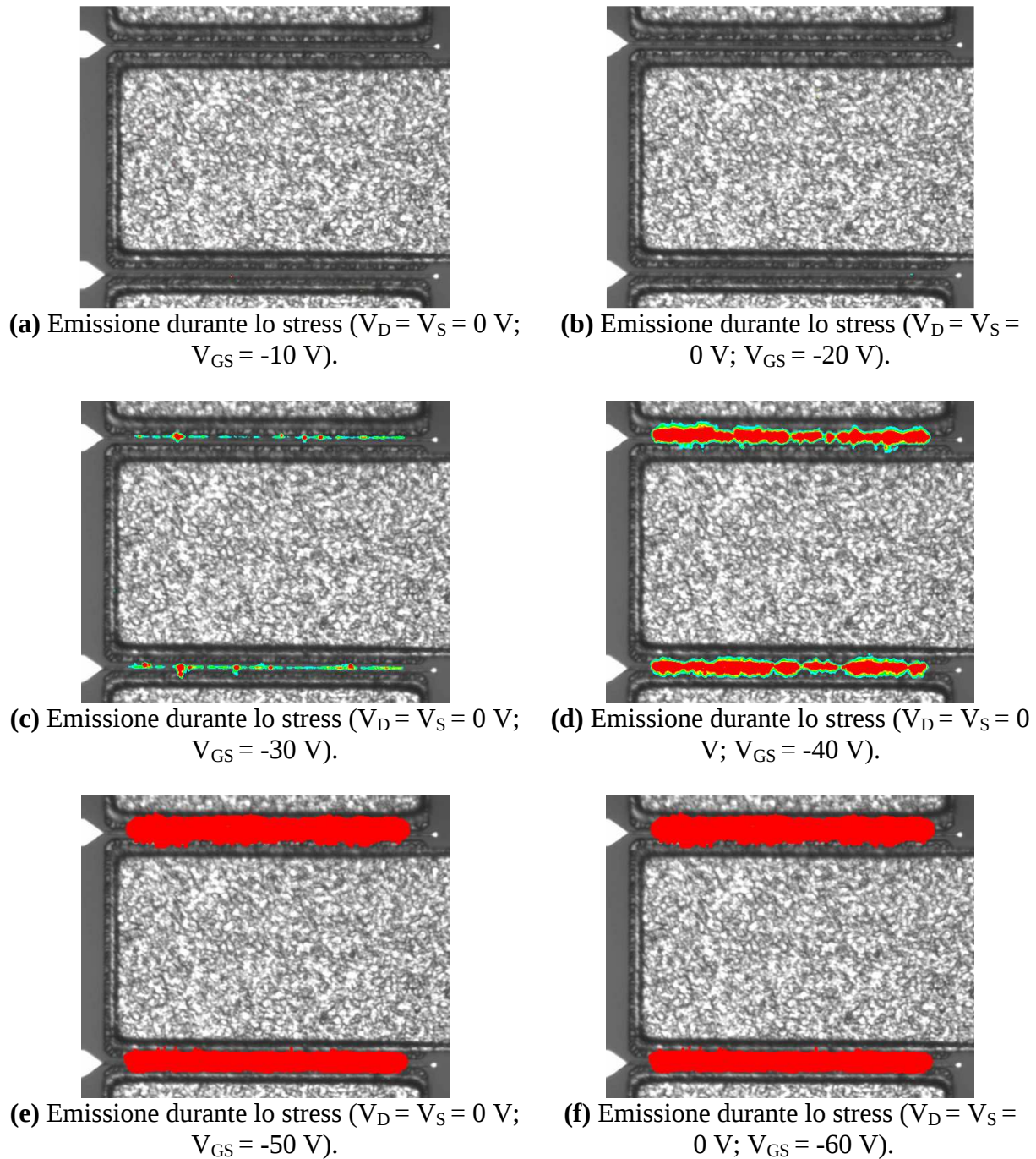


Figura 5.7: Emissioni durante lo stress su Y – 6A.

Considerazioni

Dai grafici delle caratteristiche DC (Figure 5.1 e 5.2) si può notare come vi sia stato un incremento in modulo della tensione di soglia, ovvero uno spostamento verso tensioni più negative, dopo l'intero *step stress*. Questo cambiamento indica che si è verificato un intrappolamento di carica che può avvenire ad un livello profondo (all'interno dello strato di AlGaIn) oppure sotto al contatto del gate. Inoltre si è verificato un degrado delle prestazioni

dell'HEMT dato che si nota un abbassamento dei valori massimi di transconduttanza e dei valori massimi della corrente I_D in funzione della tensione V_{DS} , dovuto ad un intrappolamento che avviene nella zona superficiale situata tra gate e drain.

Dalle variazioni dei parametri DC durante lo stress (Figure 5.3 e 5.4) si può notare che vi è stato un aumento delle correnti di leakage (Figure 5.3(c) e 5.3(d)) e delle correnti dei diodi gate-source e gate-drain (Figure 5.3(e) e 5.3(f)) a partire da una certa tensione di stress V_{GS} , pari a -25V, dopo la quale infatti si sono verificati i primi evidenti segni di degrado come si nota anche dagli spot di fotoni emessi in condizioni di dispositivo spento "OFF state" (Figure 5.6(d), 5.6(e), 5.6(f) e 5.6(g)). Inoltre dalle Figure 5.4(c) e 5.4(d) si possono vedere le stesse correlazioni di degrado del dispositivo, tra la corrente media di gate ed il conteggio di fotoni emessi, a partire da $V_{GS} = -25V$, sia durante lo stress sia durante le emissioni in OFF state.

Infine dalle immagini in condizioni di dispositivo acceso "ON state" (Figure 5.5) si vede che l'emissione di fotoni del dispositivo cala progressivamente con l'aumentare della tensione di stress V_{GS} . Questo è dovuto ancora una volta al fenomeno di intrappolamento di carica. Viceversa nelle immagini di elettroluminescenza durante lo stress (Figura 5.7) si vede il progressivo incremento delle emissioni con l'aumentare della tensione di stress V_{GS} .

5.2 Step Stress in corrente

Lo step-stress in corrente è realizzato applicando al gate correnti negative (in OFF-state) crescenti, in modulo, a partire da 500nA (200nA per i TLM05) fino ad un massimo di corrente applicata che variava in base alla robustezza del dispositivo, mantenendo source e drain a massa. La durata di ogni step è stata fissata inizialmente a $t_{step} = 120sec$, mentre per i dispositivi TLM05 stressati in seguito il passo di stress si raddoppiava a partire da una determinata corrente critica. In questo modo si portano i diodi gate-drain e gate-source in condizioni di polarizzazione inverse sempre più degradanti e si possono valutare gli effetti di degrado. Per ogni passo di stress sono state acquisite con il phemos le emissioni nelle tre condizioni di seguito descritte:

- **Stress:** durante lo stress; tempo di esposizione 120 s, $I_G = var$, $V_D = 0 V$, $V_S = 0 V$.
- **ON:** canale aperto; tempo di esposizione 5 s, $V_G = 0 V$, $V_D = 10 V$, $V_S = 0 V$.
- **OFF:** canale chiuso; tempo di esposizione 240 s, $V_G = -10 V$, $V_D = 0 V$, $V_S = 0 V$.

È stata fatta anche la completa caratterizzazione DC sul dispositivo vergine e dopo ogni passo di stress.

Sono stati sottoposti a questo stress un dispositivo HEMT in configurazione RF ed alcuni dei dispositivi TLM05 presenti sul wafer Selex-35. Come per lo *step stress* in tensione, tutte le immagini riportate nel seguito sono state prese al phemos con un ingrandimento 50X e sono presentate in modo da avere sempre il source nella parte sopra e il drain nella parte sotto dell'immagine.

SELEX-35 - X5-A

In figura 5.8 e 5.9 sono riportati i confronti tra le caratteristiche DC di un dispositivo HEMT vergine e le caratteristiche DC del dispositivo dopo l'ultimo passo di stress per verificare il degrado complessivo avvenuto dopo l'intero *step stress*.

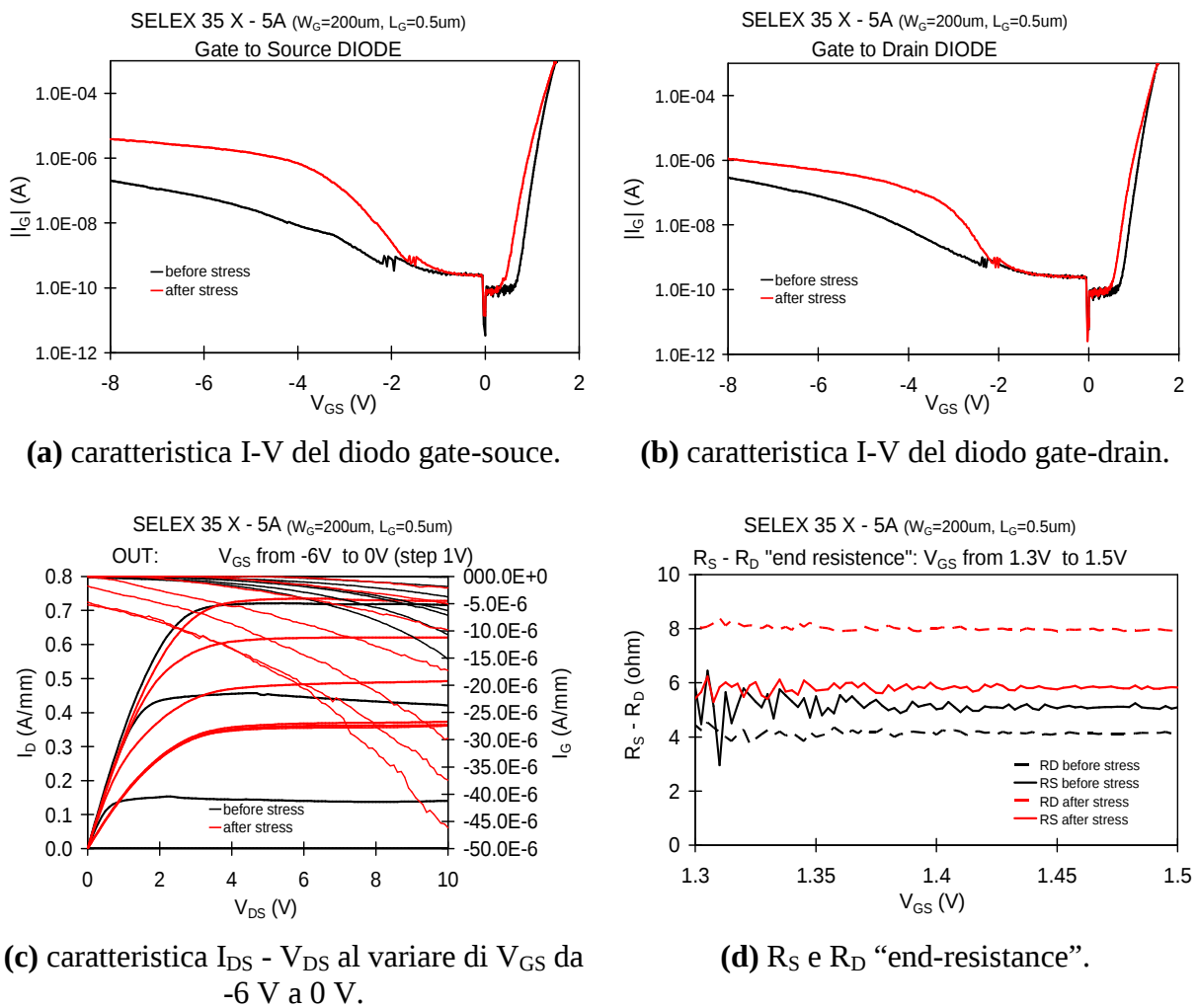
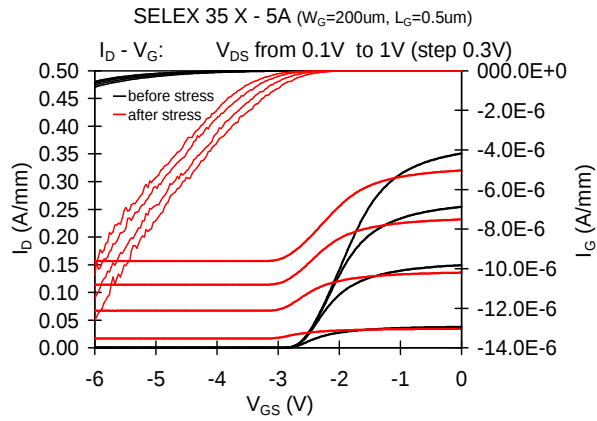
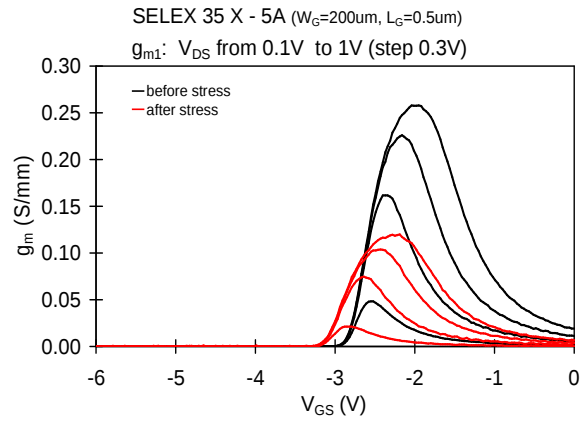


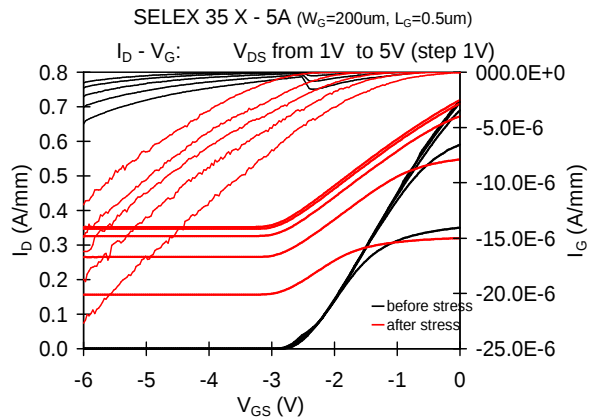
Figura 5.8: Misure DC su SELEX-35 X5 – A prima e dopo lo *step stress* in corrente.



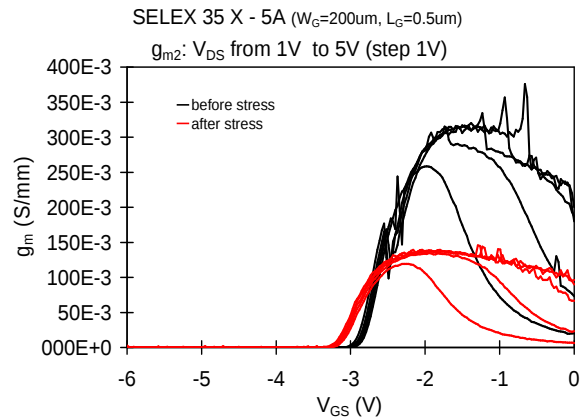
(a) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



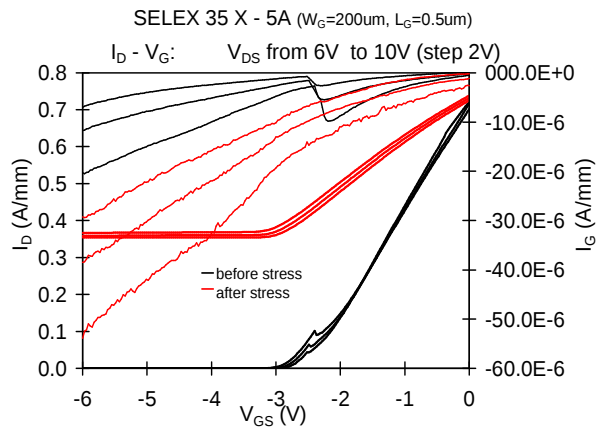
(b) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



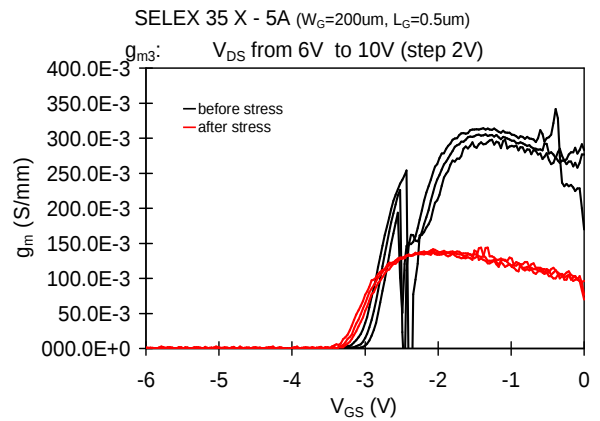
(c) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



(d) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



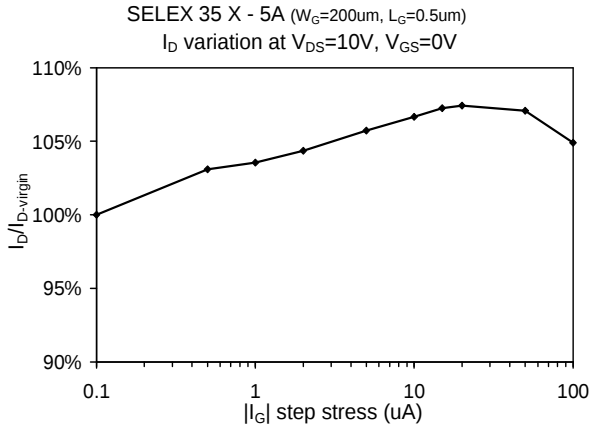
(e) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.



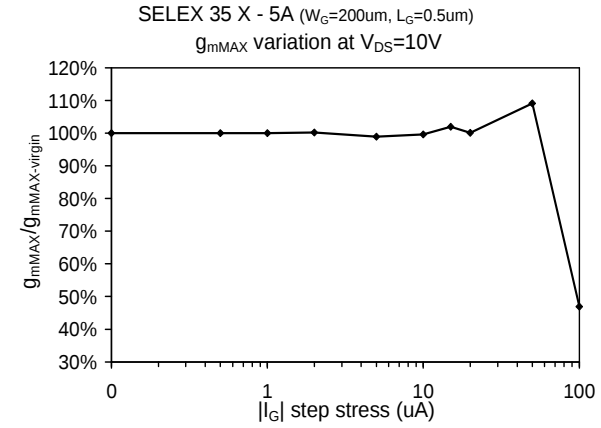
(f) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.

Figura 5.9: Misure DC su SELEX-35 X5 – A prima e dopo lo *step stress* in corrente.

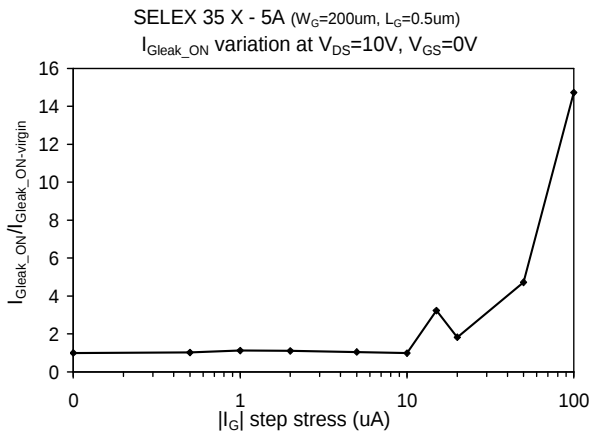
In figura 5.10 e 5.11 sono riportate le variazioni dei principali parametri DC durante ogni passo dello *step stress*.



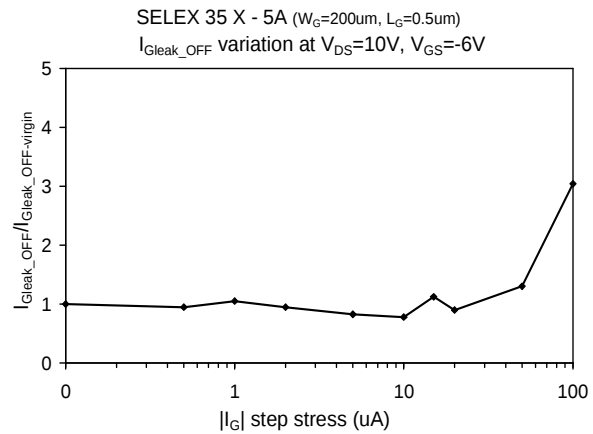
(a) variazione di I_D a $V_{DS} = 10\text{ V}$ e $V_{GS} = 0\text{ V}$ durante lo stress.



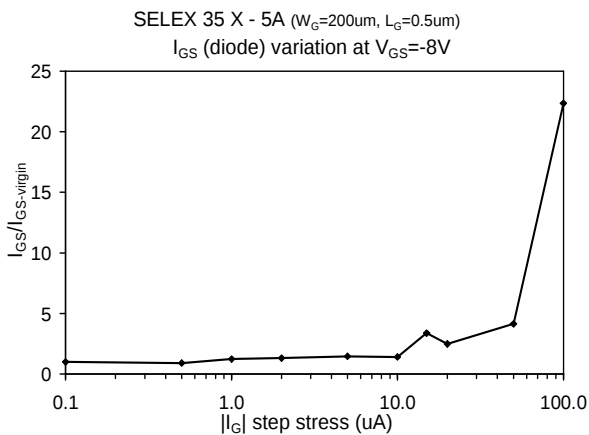
(b) variazione di g_{mMAX} a $V_{DS} = 10\text{ V}$ durante lo stress.



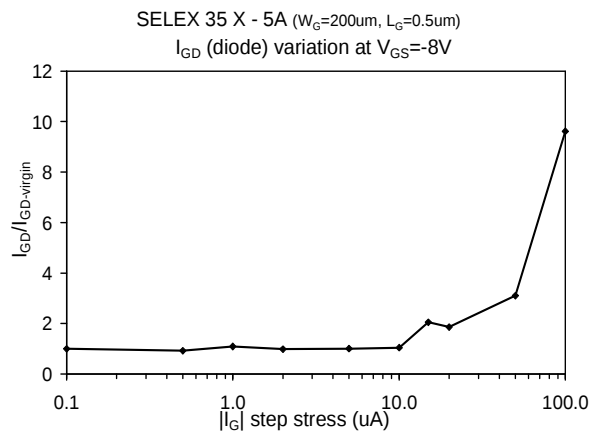
(c) variazione di I_{Gleak_ON} a $V_{DS} = 10\text{ V}$ e $V_{GS} = 0\text{ V}$ durante lo stress.



(d) variazione di I_{Gleak_OFF} a $V_{DS} = 10\text{ V}$ e $V_{GS} = -6\text{ V}$ durante lo stress.

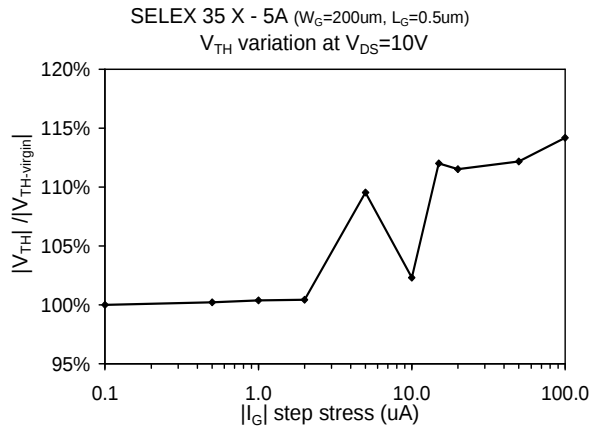


(e) variazione della corrente del diodo gate-source durante lo stress.

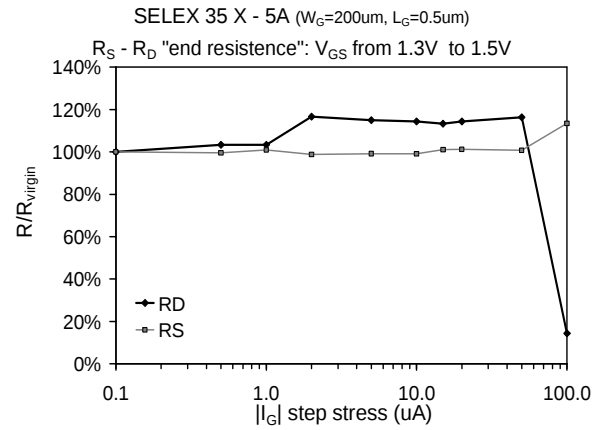


(f) variazione della corrente del diodo gate-drain durante lo stress.

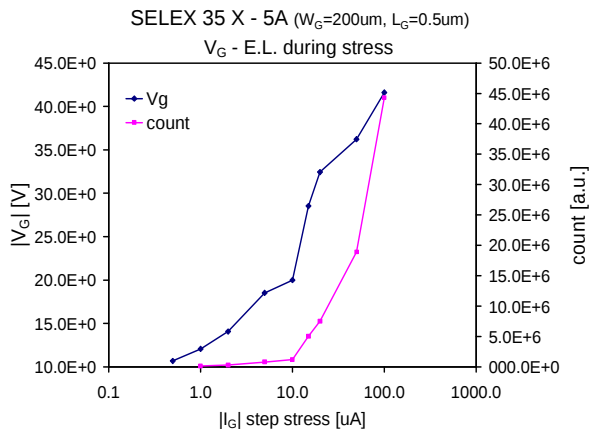
Figura 5.10: Variazioni parametri DC su SLX-35 X5 – A durante lo *step stress* in corrente.



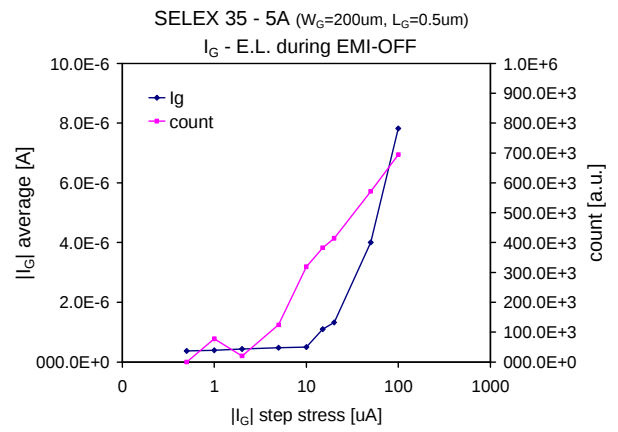
(a) variazione di V_{TH} a $V_{DS} = 10\text{ V}$ durante lo stress.



(b) variazione di R_S e R_D "end-resistance" durante lo stress.



(c) I_G e E.L. durante lo stress.



(d) I_G e E.L. durante le emissioni in condizioni di OFF state.

Figura 5.11: Variazioni parametri DC su SLX-35 X5 – A durante lo *step stress* in corrente.

Infine in Figura 5.12, 5.13 e 5.14 si riportano le immagini di emissioni rispettivamente nelle condizioni di:

- **ON:** canale aperto; tempo di esposizione 5 s, $V_G = 0\text{ V}$, $V_{DS} = 10\text{ V}$, $V_S = 0\text{ V}$.
- **OFF:** canale chiuso; tempo di esposizione 240 s, $V_{GS} = -10\text{ V}$, $V_D = 0\text{ V}$, $V_S = 0\text{ V}$.
- **Stress:** durante lo stress; tempo di esposizione 120 s, $I_{GS} = -500\text{ nA}$, $-1\text{ }\mu\text{A}$, $-2\text{ }\mu\text{A}$, $-5\text{ }\mu\text{A}$, $-10\text{ }\mu\text{A}$, $-20\text{ }\mu\text{A}$, $-50\text{ }\mu\text{A}$, $-100\text{ }\mu\text{A}$, $V_D = 0\text{ V}$, $V_S = 0\text{ V}$.

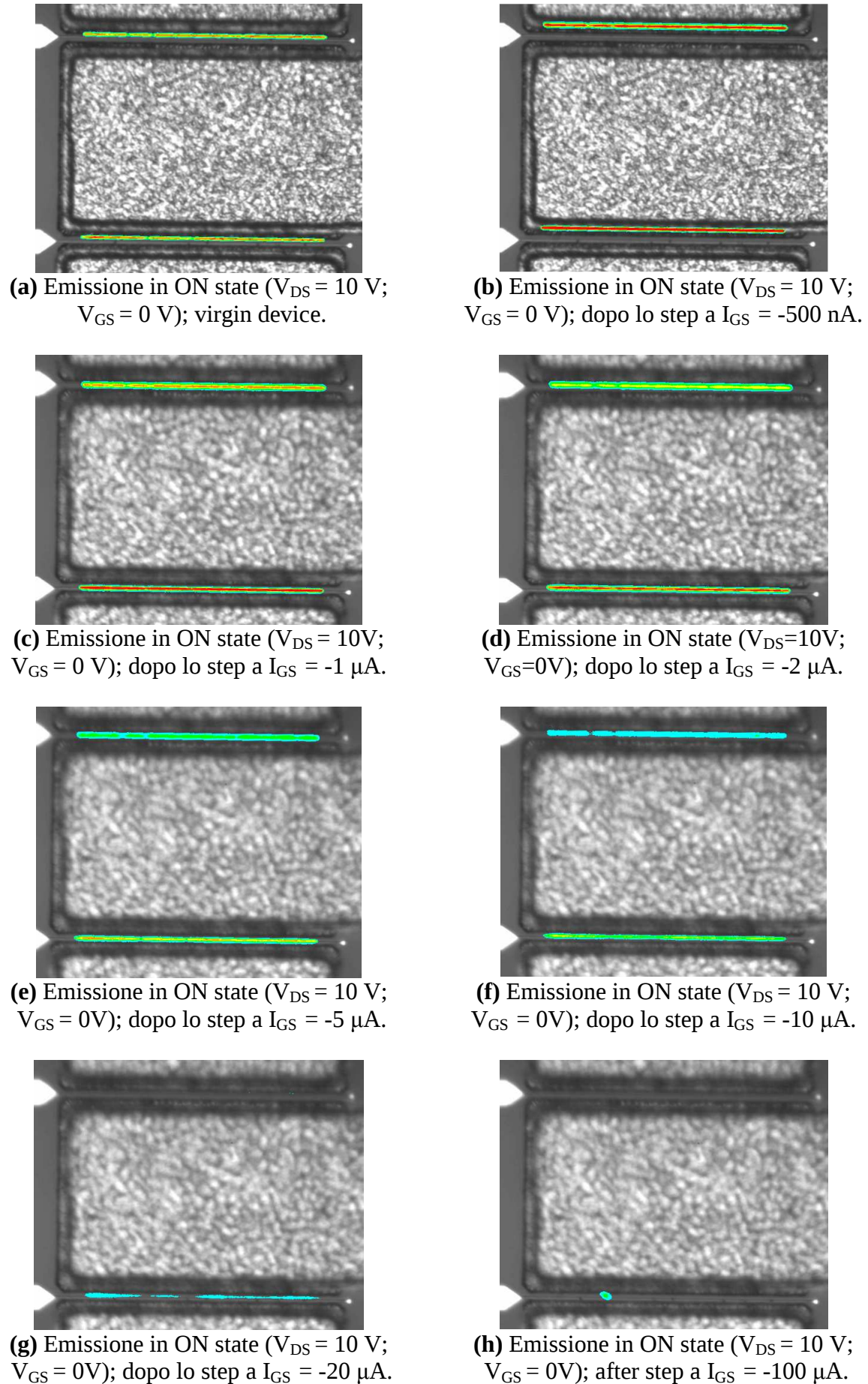


Figura 5.12: Emissioni in “ON state” su X5 – A nel corso dello *step stress* in corrente.

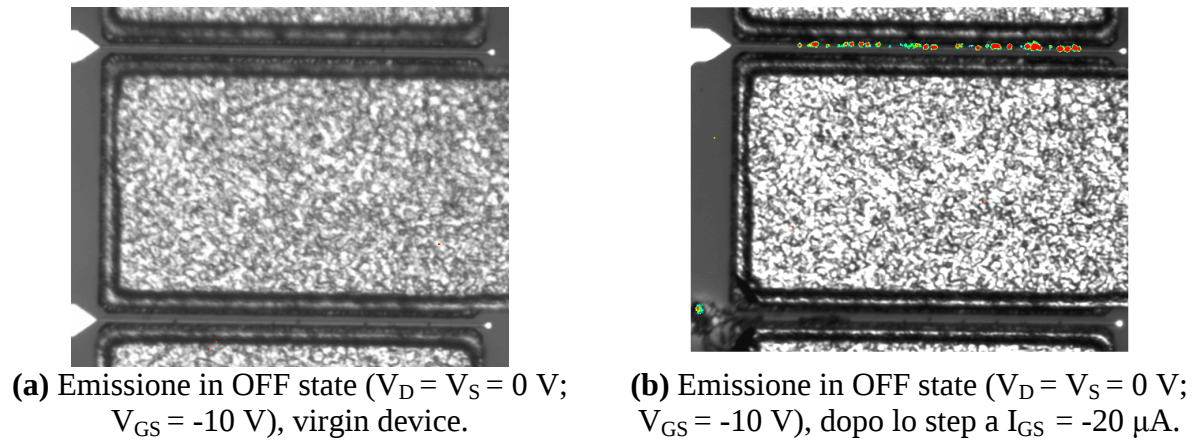


Figura 5.13: Emissioni in “OFF state” su X5 – A nel corso dello *step stress* in corrente.

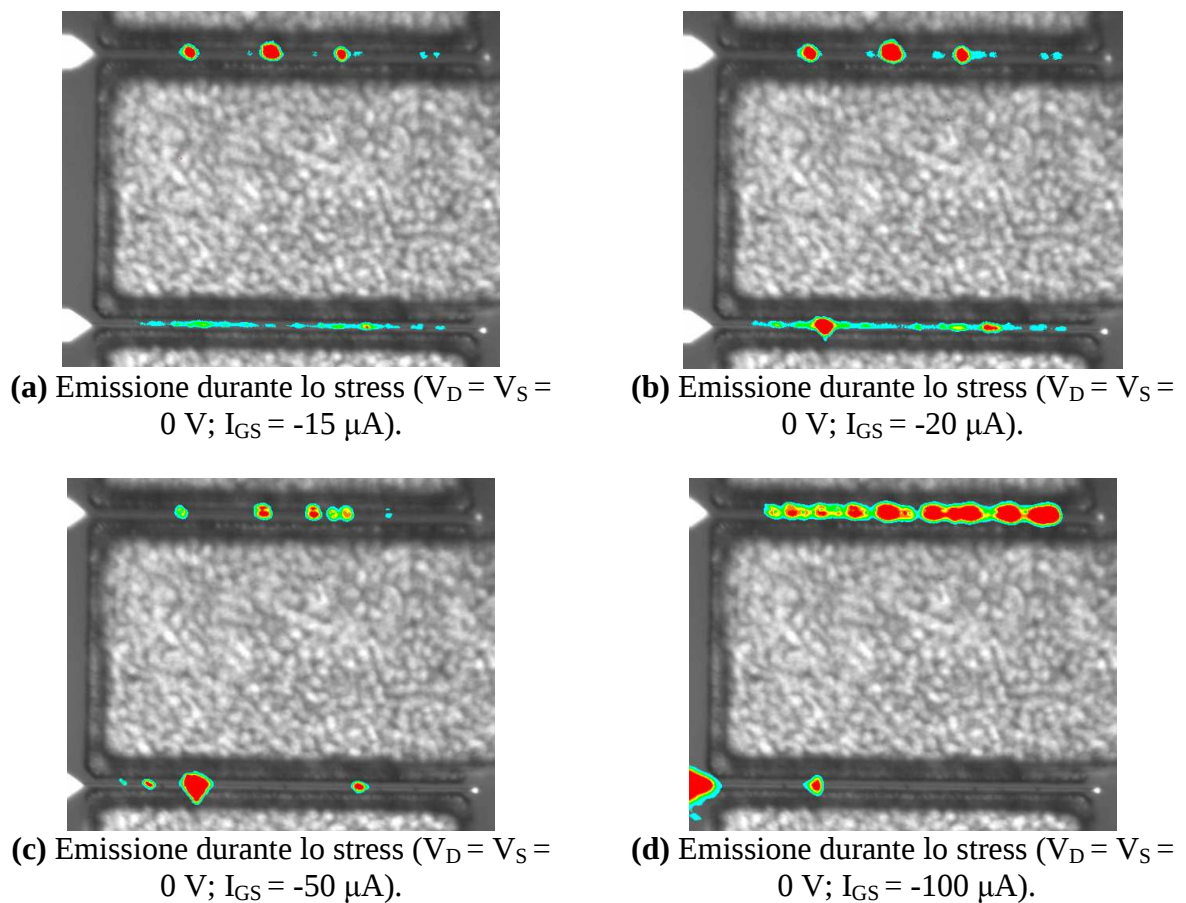


Figura 5.14: Emissioni durante lo stress su X5 – A.

Considerazioni

Dai grafici delle caratteristiche DC (Figure 5.8 e 5.9) si può notare che il dispositivo dopo lo stress non chiude più il canale (Figura 5.8(c)), per cui il suo funzionamento è irrimediabilmente compromesso. Come nello stress in tensione, anche nello stress in corrente vi è stato un incremento in modulo della tensione di soglia, ovvero uno spostamento verso tensioni più negative, dopo l'intero *step stress*. Questo cambiamento indica che si è verificato un intrappolamento di carica che può avvenire ad un livello profondo (all'interno dello strato di AlGaN) oppure sotto al contatto del gate. Inoltre si è verificato anche un degrado delle prestazioni dell'HEMT dato che si nota un abbassamento dei valori massimi di transconduttanza e dei valori massimi della corrente I_D in funzione della tensione V_{DS} , dovuto ad un intrappolamento che avviene nella zona superficiale situata tra gate e drain.

Dalle variazioni dei parametri DC durante lo stress (Figure 5.10 e 5.11) si può notare che vi è stato un aumento delle correnti di leakage (Figure 5.10(c) e 5.10(d)) e delle correnti dei diodi gate-source e gate-drain (Figure 5.10(e) e 5.10(f)) a partire da una certa corrente di stress I_{GS} , pari a $-20 \mu A$, a cui corrisponde una tensione media V_{GS} di circa $-25 V$, ovvero la stessa tensione critica riscontrata con lo stress in tensione. Dopo questo step, infatti, si sono visualizzati i primi evidenti segni di degrado come si può notare dagli spot di fotoni emessi in condizioni di dispositivo spento "OFF state" (Figura 5.13(b)). Inoltre dalla Figura 5.11(d) si possono vedere le stesse correlazioni di degrado del dispositivo, tra la tensione media di gate ed il conteggio di fotoni emessi, a partire da $I_{GS} = -20 \mu A$, durante le emissioni in "OFF state".

Infine dalle immagini in condizioni di dispositivo acceso "ON state" (Figure 5.12) si vede che l'emissione di fotoni del dispositivo cala progressivamente con l'aumentare della corrente di stress I_{GS} . Questo è dovuto ancora una volta al fenomeno di intrappolamento di carica. Viceversa nelle immagini di elettroluminescenza durante lo stress (Figura 5.14) si vede il progressivo incremento delle emissioni con l'aumentare della corrente di stress I_{GS} .

In seguito sono stati stressati alcuni dispositivi TLM05 partendo da una corrente iniziale di -200 nA fino ad una presunta corrente critica pari a -2 μA con passi di stress crescenti nel tempo in maniera esponenziale, ovvero $t_{\text{step}} = 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 90$ minuti (per un totale di 10 ore di stress).

SELEX-35 - TLM05 X4

In figura 5.15 e 5.16 sono riportati i confronti tra le caratteristiche DC del dispositivo TLM05 stressato con una corrente di -1 μA e le caratteristiche DC del dispositivo dopo l'ultimo passo di stress a -2 μA , per verificare il degrado complessivo avvenuto dopo l'intero *step stress*.

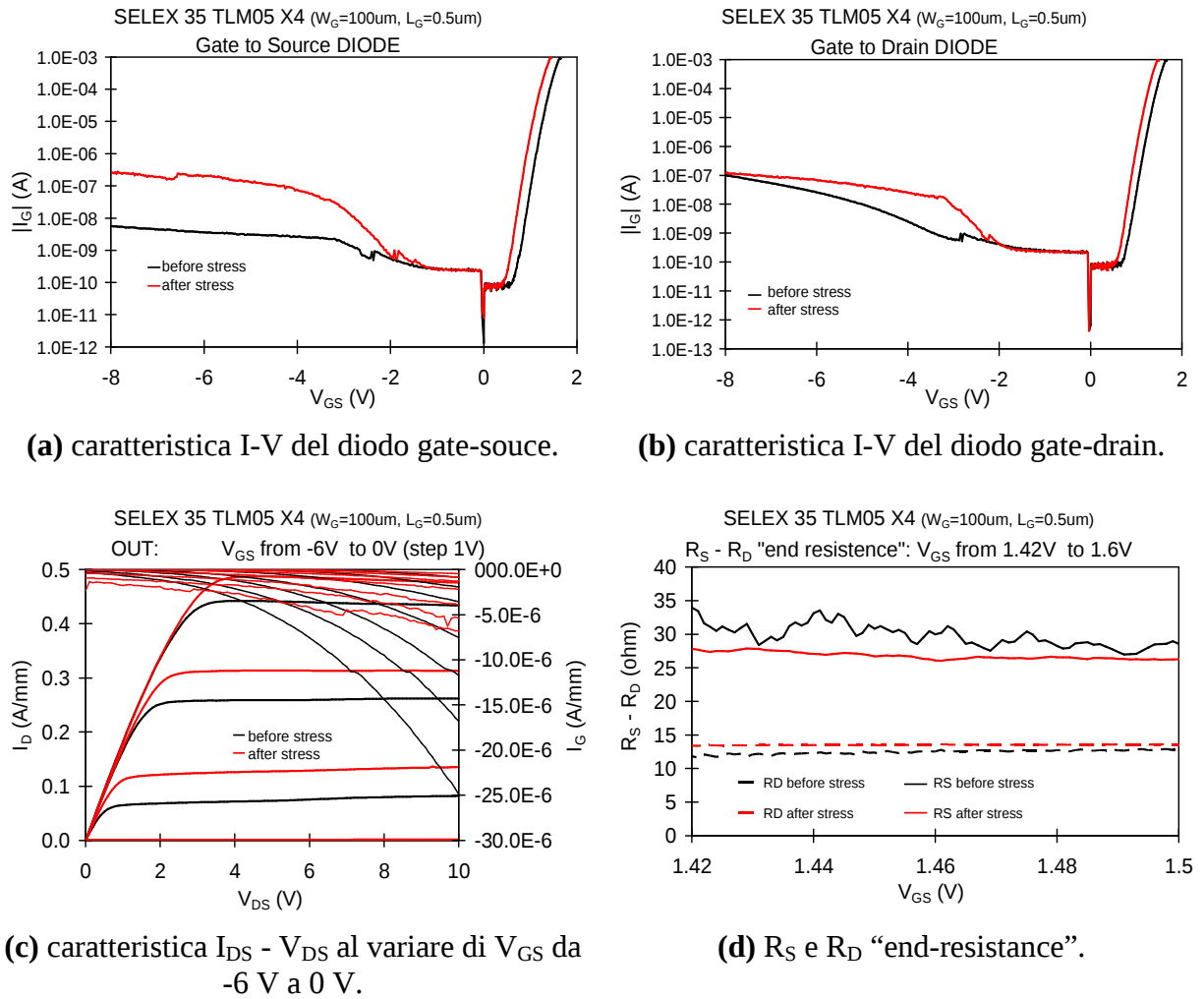
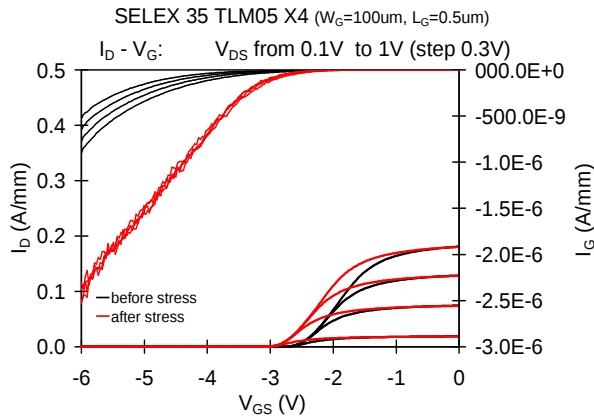
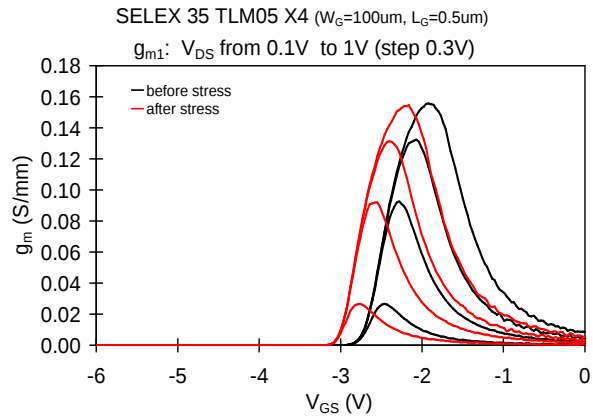


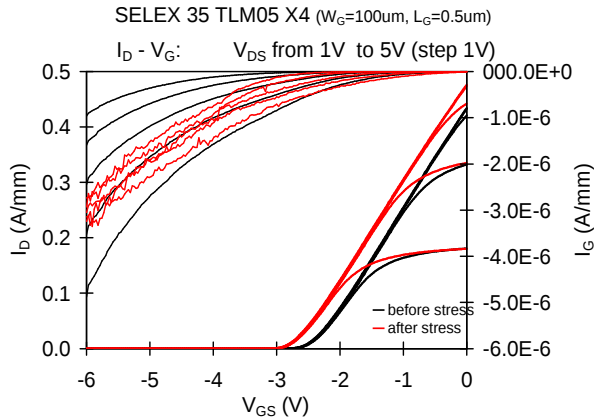
Figura 5.15: Misure DC su TLM05 X4 prima e dopo lo *step stress* in corrente.



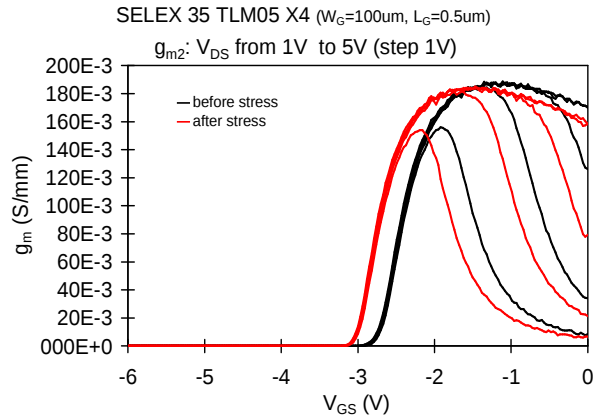
(a) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



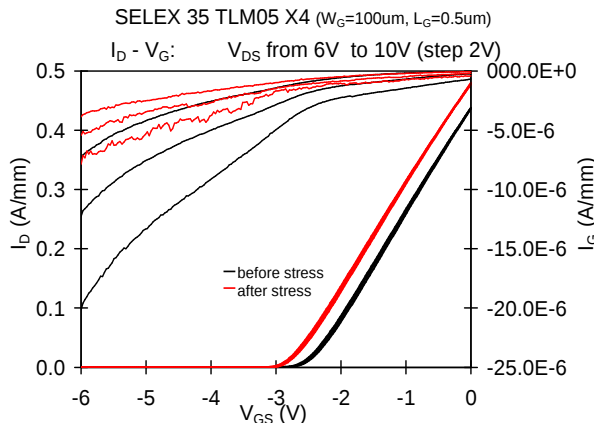
(b) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



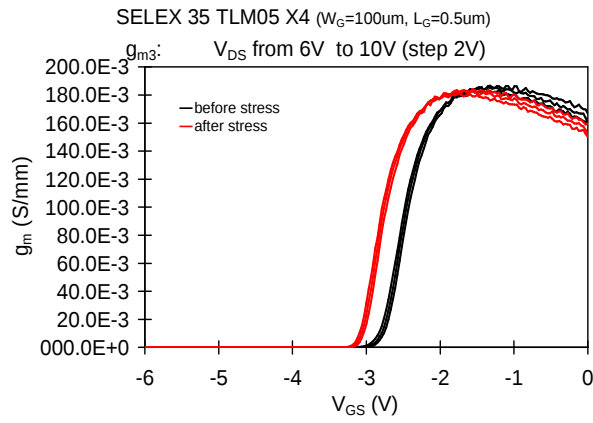
(c) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



(d) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



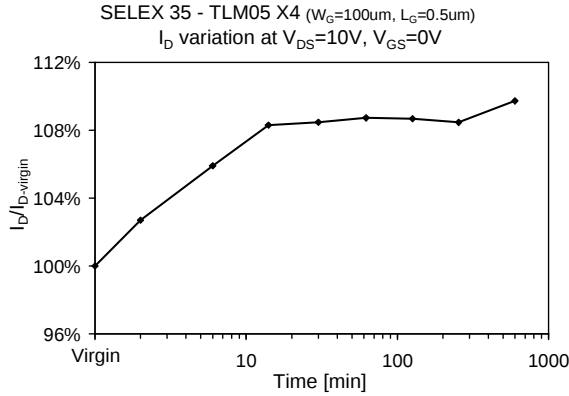
(e) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.



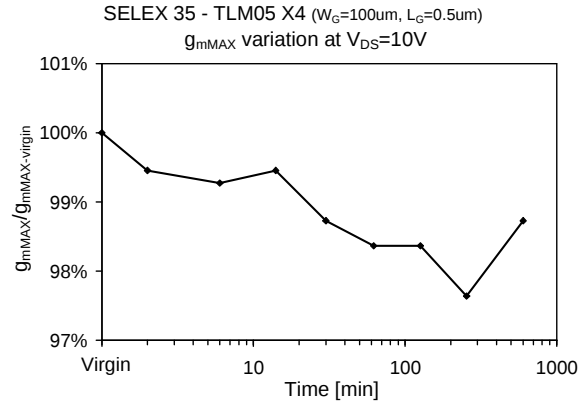
(f) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.

Figura 5.16: Misure DC su TLM05 X4 prima e dopo lo *step stress* in corrente.

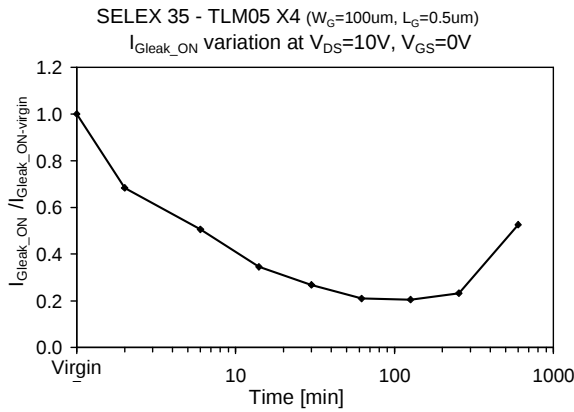
In figura 5.17 e 5.18 sono riportate le variazioni dei principali parametri DC durante ogni passo dello *step stress*.



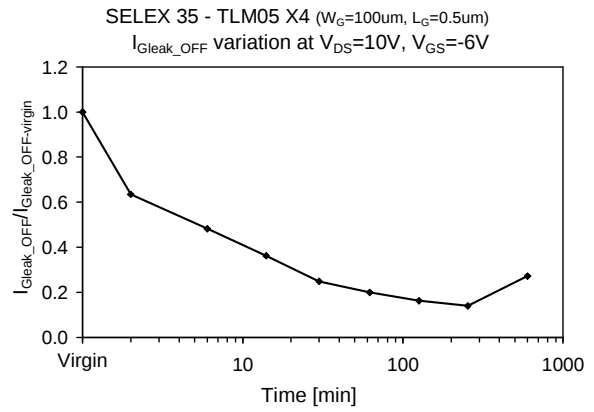
(a) variazione di I_D a $V_{DS} = 10 V$ e $V_{GS} = 0 V$ durante lo stress.



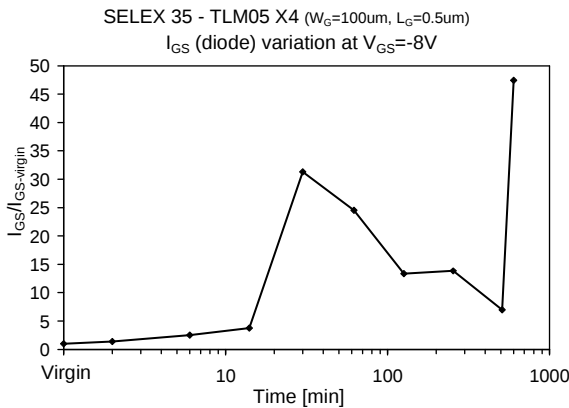
(b) variazione di g_{mMAX} a $V_{DS} = 10 V$ durante lo stress.



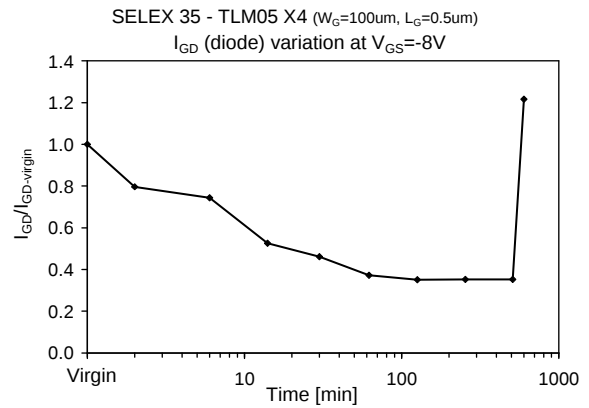
(c) variazione di I_{Gleak_ON} a $V_{DS} = 10 V$ e $V_{GS} = 0 V$ durante lo stress.



(d) variazione di I_{Gleak_OFF} a $V_{DS} = 10 V$ e $V_{GS} = -6 V$ durante lo stress.



(e) variazione della corrente del diodo gate-source durante lo stress.



(f) variazione della corrente del diodo gate-drain durante lo stress.

Figura 5.17: Variazioni parametri DC su TLM05 X4 durante lo *step stress* in corrente.

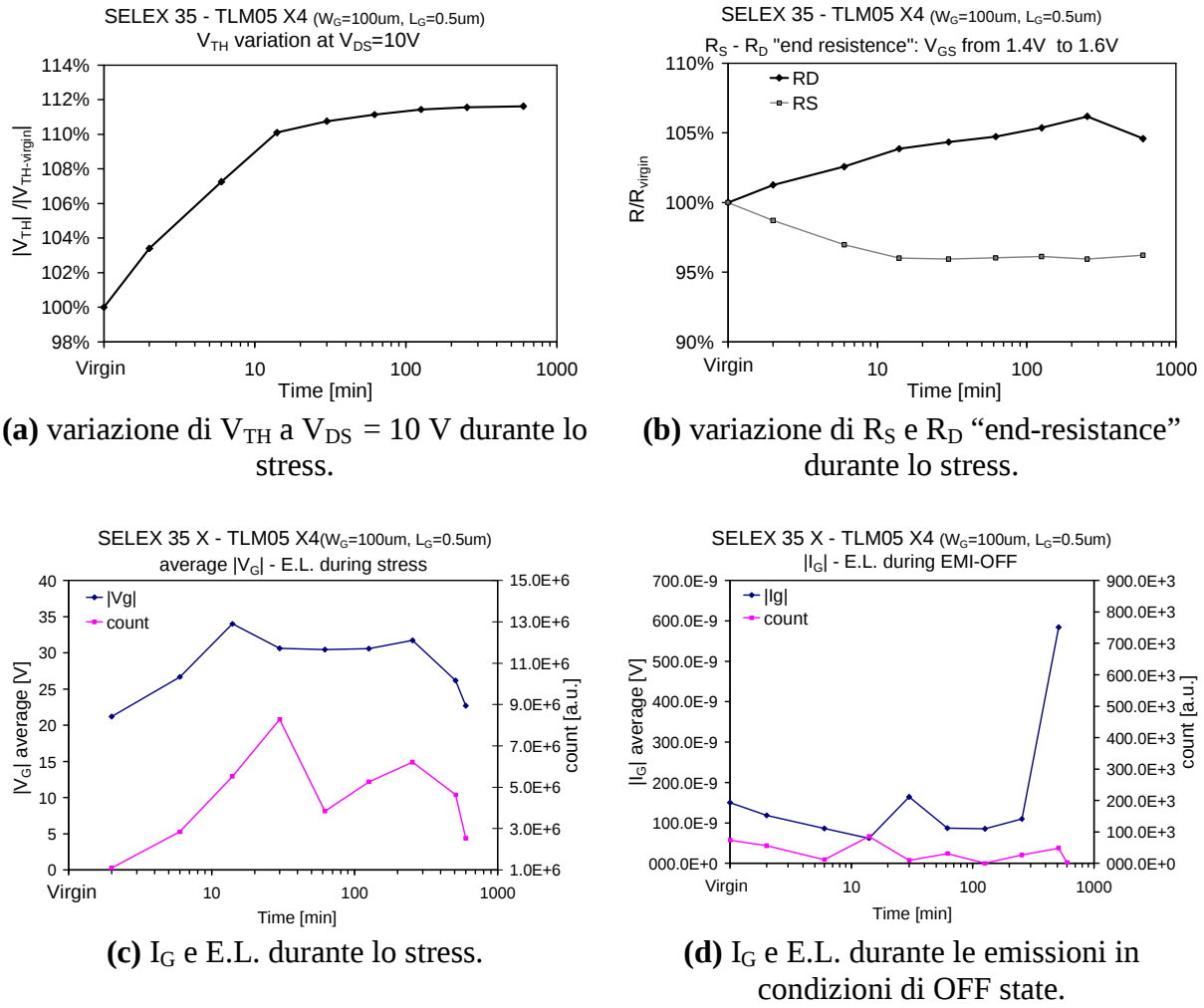


Figura 5.18: Variazioni parametri DC su TLM05 X4 durante lo *step stress* in corrente.

Di seguito si riportano gli andamenti della tensione V_{GS} nel tempo nell'arco dell'intero step stress con corrente fissata pari a $-2 \mu A$. Si vuole, infatti, vedere la variazione di V_{GS} in relazione con eventuali manifestazioni di degrado del dispositivo nel tempo.

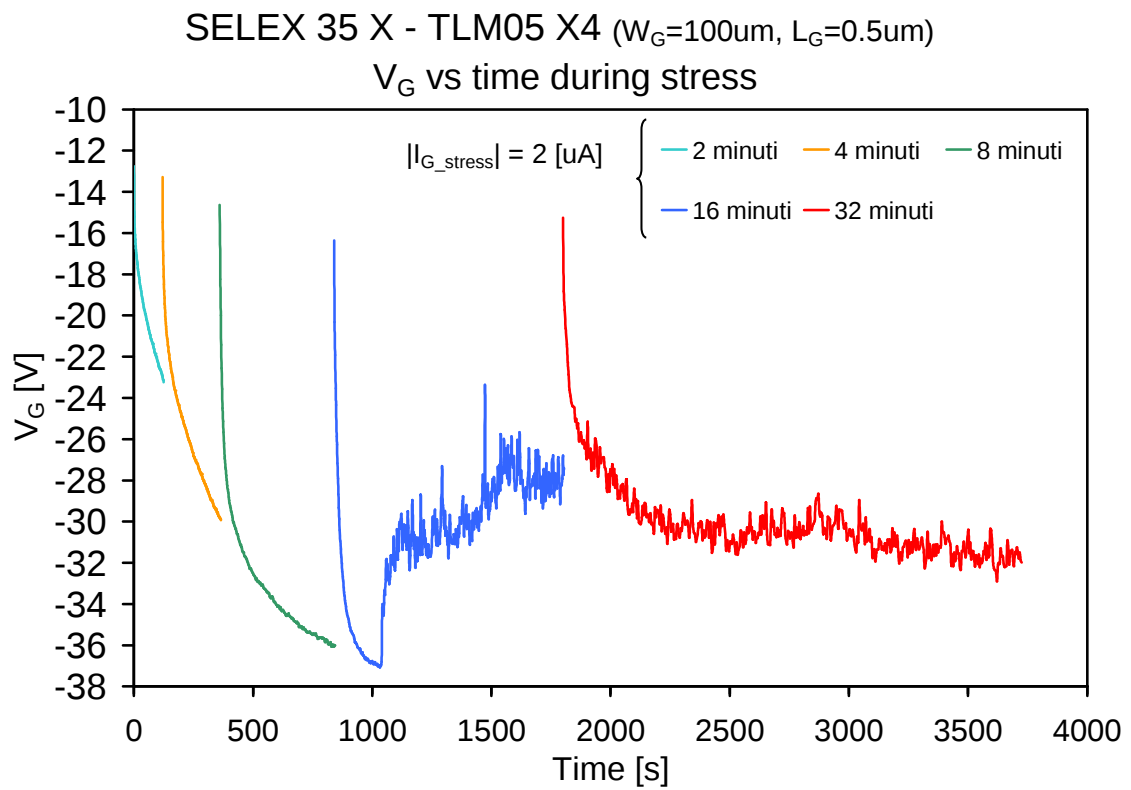


Figura 5.19: Transitorio della V_{GS} su TLM05 X4 durante lo stress in corrente (prima parte).

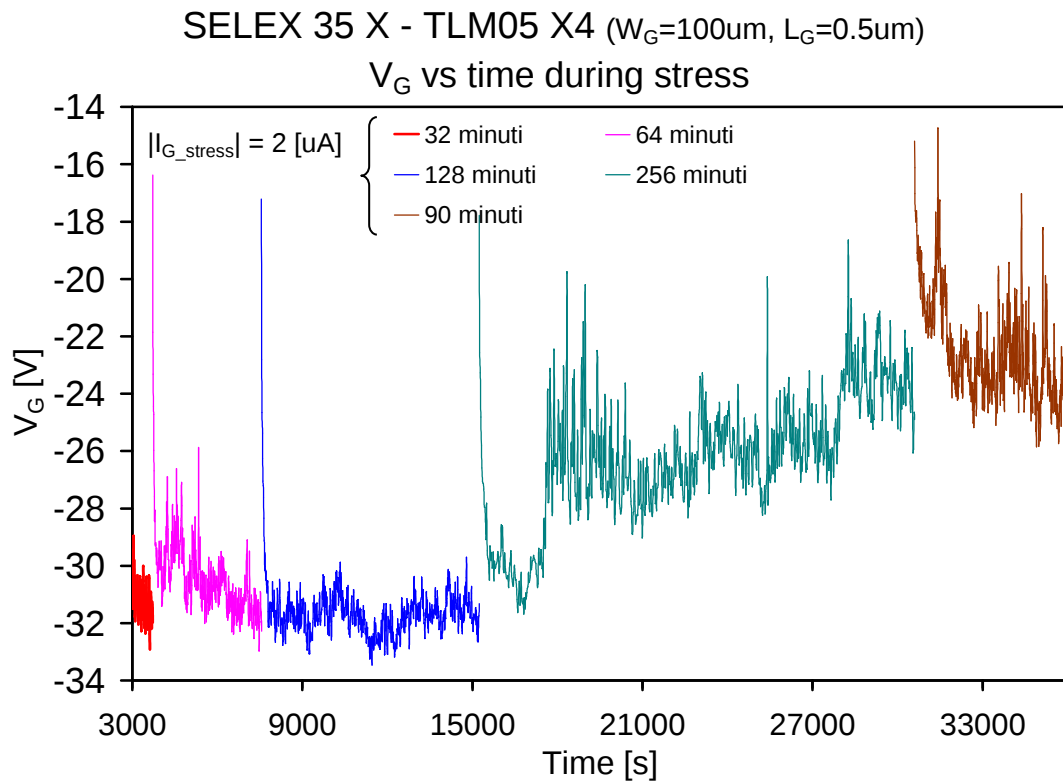
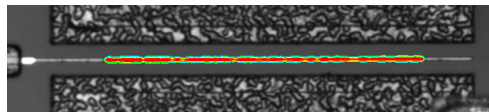


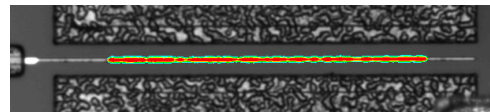
Figura 5.20: Transitorio della V_{GS} su TLM05 X4 durante stress in corrente (seconda parte).

Infine in Figura 5.21, 5.22 e 5.23 si riportano le immagini di emissioni rispettivamente nelle condizioni di:

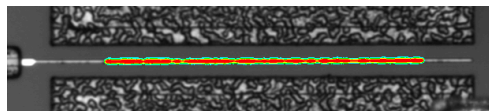
- **ON:** canale aperto; tempo di esposizione 5 s, $V_G = 0$ V, $V_{DS} = 10$ V, $V_S = 0$ V.
- **OFF:** canale chiuso; tempo di esposizione 240 s, $V_{GS} = -10$ V, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.
- **Stress:** durante lo stress; tempi di esposizione 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 90 minuti, $I_{GS} = -2$ μ A, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.



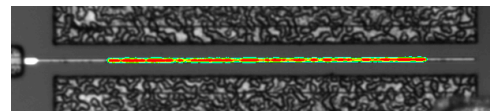
(a) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -1$ μ A (tempo di stress = 120 s).



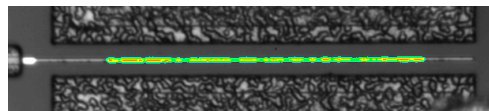
(b) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 120 s).



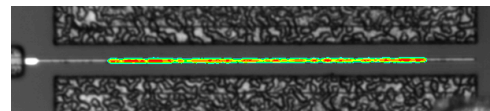
(c) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 240 s).



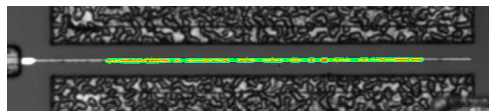
(d) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 480 s).



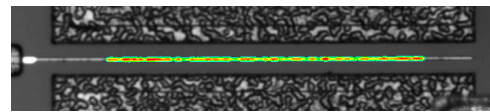
(e) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 960 s).



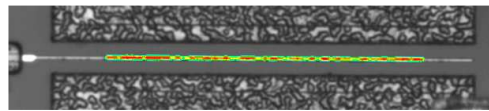
(f) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 1920 s).



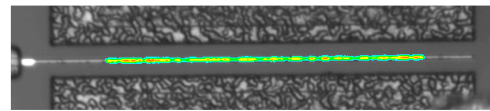
(g) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 3840 s).



(h) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 7680 s).

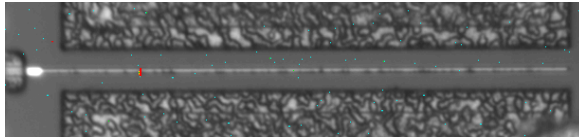


(i) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 15360 s).

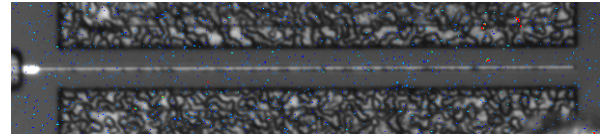


(j) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 5400 s).

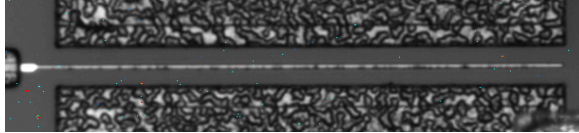
Figura 5.21: Emissioni in “ON state” su TLM05 X4 nel corso dello *step stress* in corrente.



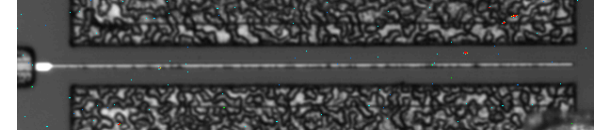
(a) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -1$ μ A (tempo di stress = 120 s).



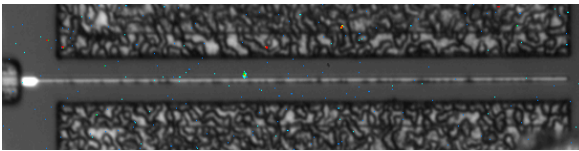
(b) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 120 s).



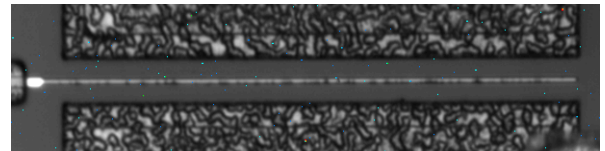
(c) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 240 s).



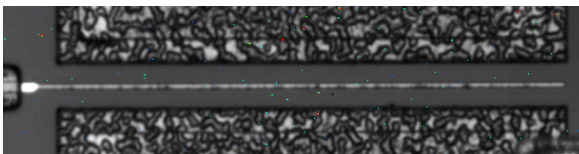
(d) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 480 s).



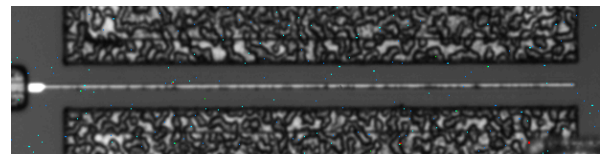
(e) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 960 s).



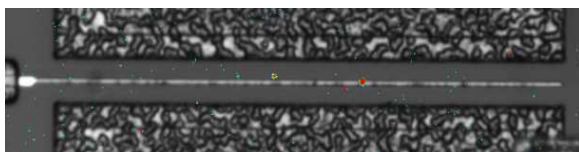
(f) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 1920 s).



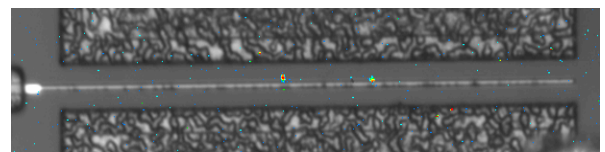
(g) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 3840 s).



(h) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 7680 s).



(i) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 15360 s).



(j) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 5400 s).

Figura 5.22: Emissioni in “OFF state” su TLM05 X4 nel corso dello *step stress* in corrente.

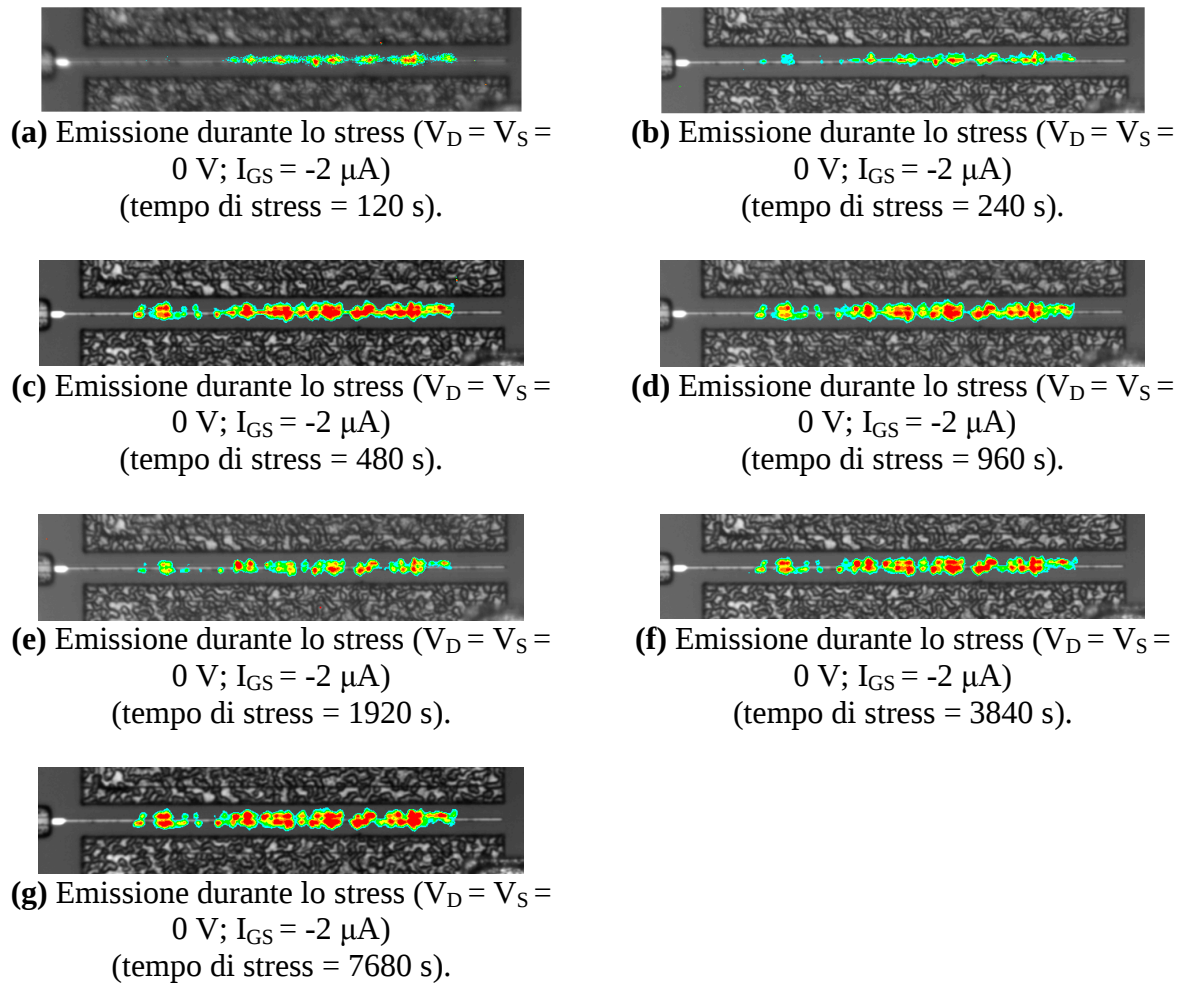


Figura 5.23: Emissioni durante lo stress su TLM05 X4.

Considerazioni

È importante notare dalla Figure 5.15(a) un aumento di oltre un ordine di grandezza della corrente di leakage del diodo gate-source ed il classico spostamento della tensione di soglia nei grafici di Figura 5.16.

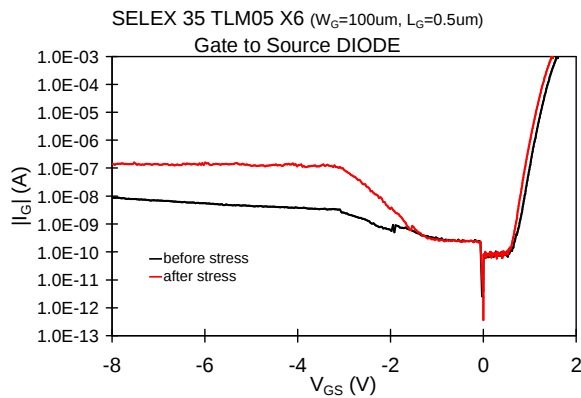
Dalle variazioni dei parametri DC durante lo stress (Figure 5.17 e 5.18) si può notare che vi è stato un aumento della corrente del diodo gate-source (Figure 5.17(e)) dopo circa 16 minuti a cui corrisponde una tensione media V_{GS} di circa -37 V (Figura 5.19). Dopo questo tempo, infatti, si sono visualizzati i primi segni di degrado come si può notare dagli spot di fotoni emessi in condizioni di dispositivo spento (Figura 5.22(e)). Successivamente, dopo circa 5 ore vi è stato un ulteriore deterioramento del dispositivo come si può notare dai grafici di “OFF state” (Figura 5.22(i)) e dall’abbassamento, in modulo, della tensione V_{GS} (Figura 5.20). Ciò è dovuto al fatto che il dispositivo, a partire da quel momento, necessita di un minore campo elettrico per far passare la stessa corrente. Inoltre dalla Figura 5.18(d) si possono vedere le

stesse correlazioni di degrado del dispositivo, tra la tensione media di gate ed il conteggio di fotoni emessi, sia durante lo stress sia durante le emissioni in “OFF state”.

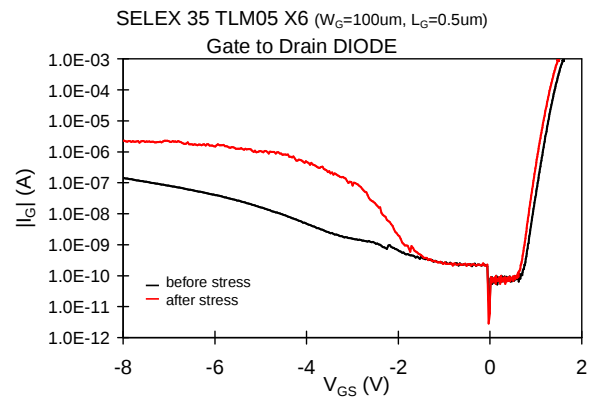
SELEX-35 - TLM05 X6

Un altro dispositivo TLM (TLM05 X6) è stato stressato, come il precedente (TLM05 X4), partendo da una corrente iniziale di -200 nA fino ad una presunta corrente critica pari a -2 μ A con passi di stress crescenti nel tempo in maniera esponenziale, ovvero $t_{\text{step}} = 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 90$ minuti (per un totale di 10 ore di stress).

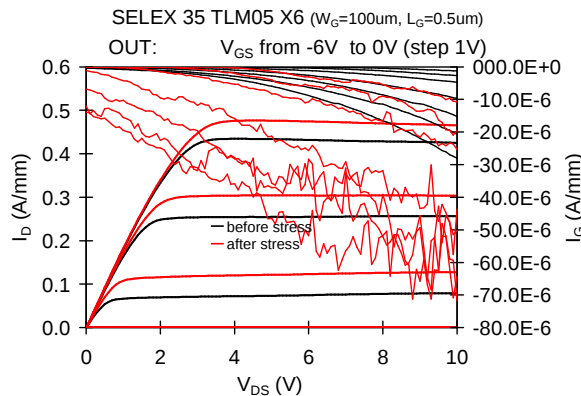
In figura 5.24 e 5.25 sono riportati i confronti tra le caratteristiche DC del dispositivo TLM05 stressato con una corrente di -1 μ A e le caratteristiche DC del dispositivo dopo l'ultimo passo di stress a -2 μ A, per verificare il degrado complessivo avvenuto dopo l'intero *step stress*.



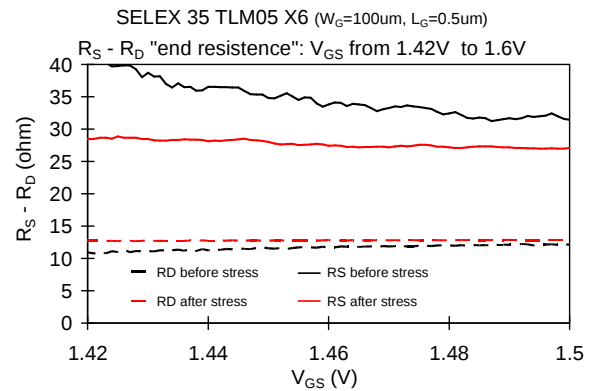
(a) caratteristica I-V del diodo gate-souce.



(b) caratteristica I-V del diodo gate-drain.

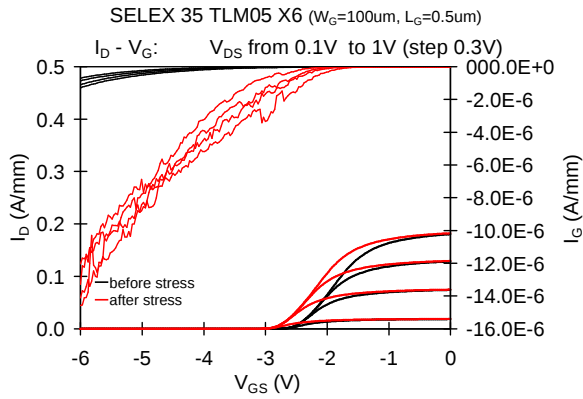


(c) caratteristica $I_{DS} - V_{DS}$ al variare di V_{GS} da -6 V a 0 V.

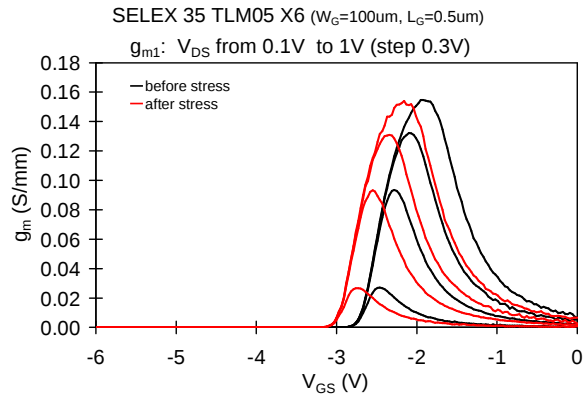


(d) R_S e R_D “end-resistance”.

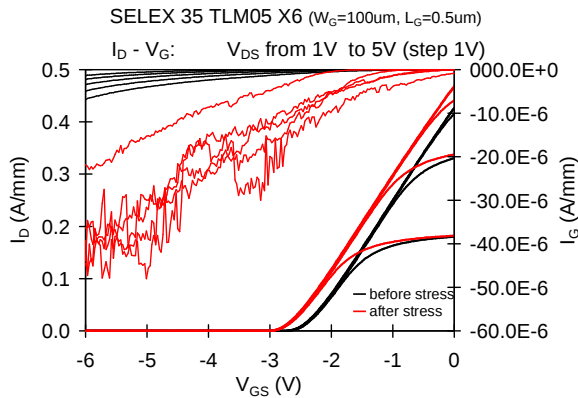
Figura 5.24: Misure DC su TLM05 X6 prima e dopo lo *step stress* in corrente.



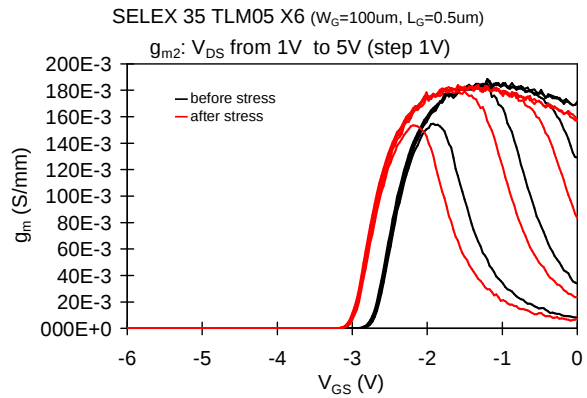
(a) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



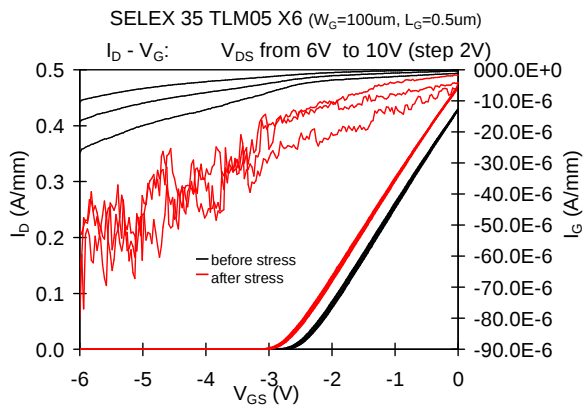
(b) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



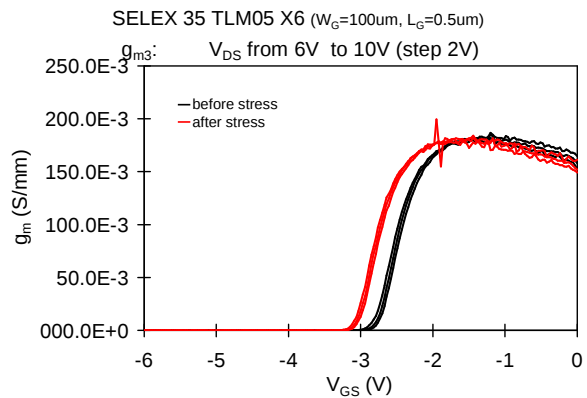
(c) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



(d) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



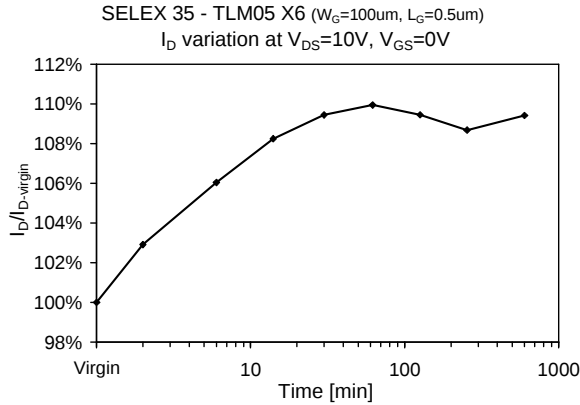
(e) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.



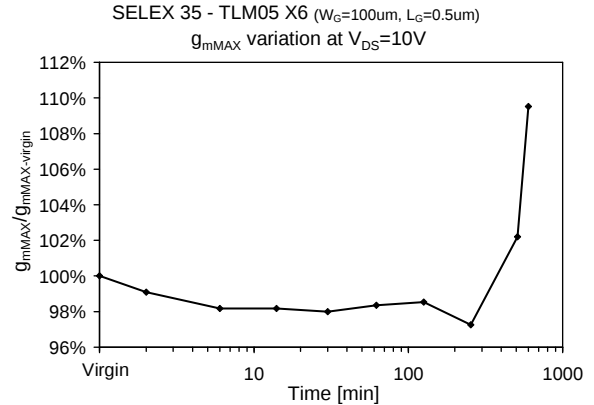
(f) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.

Figura 5.25: Misure DC su TLM05 X6 prima e dopo lo *step stress* in corrente.

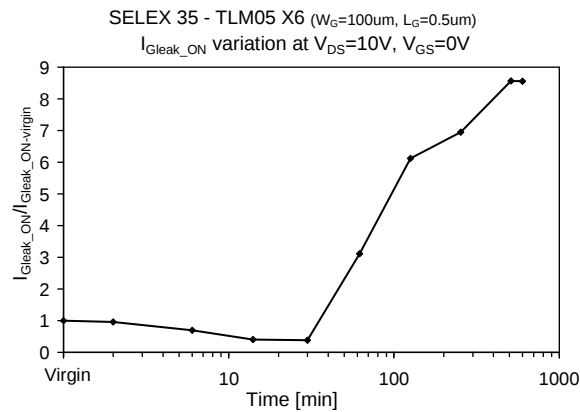
In figura 5.26 e 5.27 sono riportate le variazioni dei principali parametri DC durante ogni passo dello *step stress*.



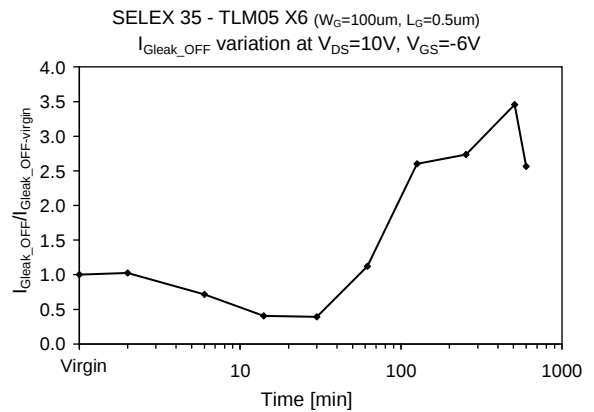
(a) variazione di I_D a $V_{DS} = 10\text{ V}$ e $V_{GS} = 0\text{ V}$ durante lo stress.



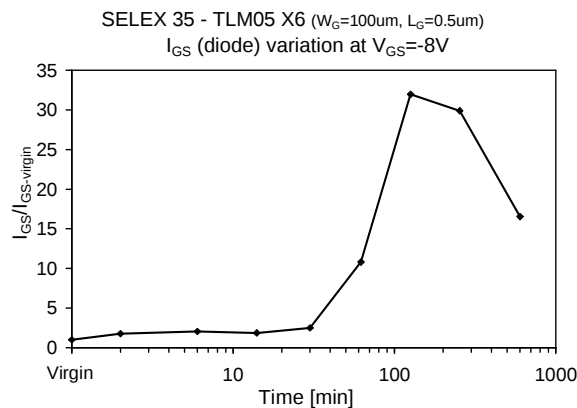
(b) variazione di $g_{m\text{MAX}}$ a $V_{DS} = 10\text{ V}$ durante lo stress.



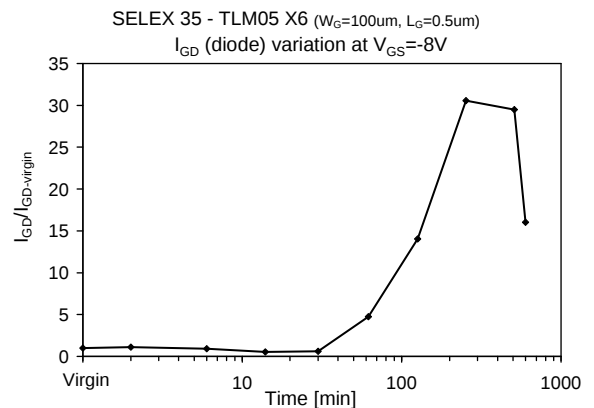
(c) variazione di $I_{\text{Gleak_ON}}$ a $V_{DS} = 10\text{ V}$ e $V_{GS} = 0\text{ V}$ durante lo stress.



(d) variazione di $I_{\text{Gleak_OFF}}$ a $V_{DS} = 10\text{ V}$ e $V_{GS} = -6\text{ V}$ durante lo stress.



(e) variazione della corrente del diodo gate-source durante lo stress.



(f) variazione della corrente del diodo gate-drain durante lo stress.

Figura 5.26: Variazioni parametri DC su TLM05 X6 durante lo *step stress* in corrente.

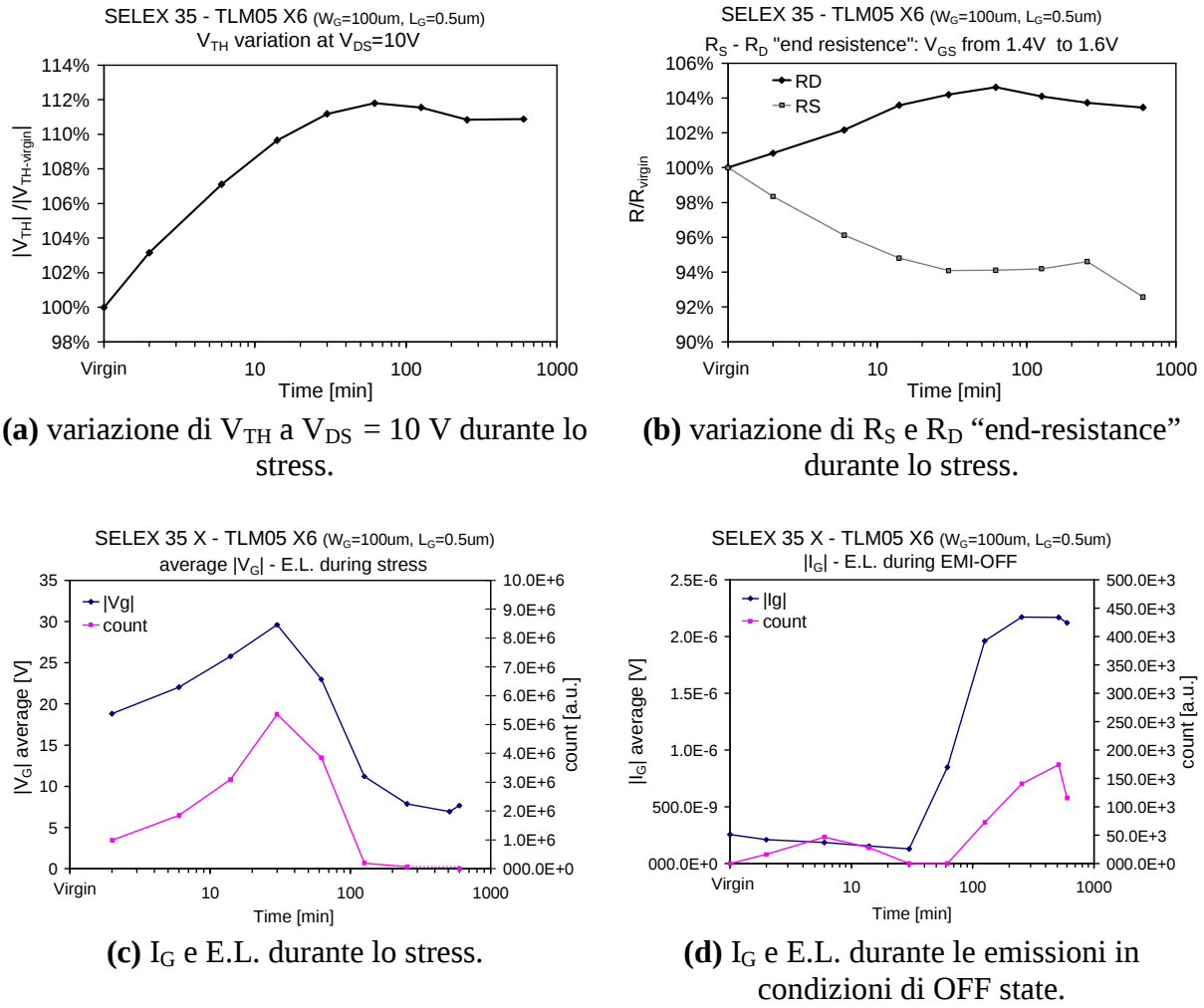


Figura 5.27: Variazioni parametri DC su TLM05 X6 durante lo *step stress* in corrente.

Di seguito si riportano gli andamenti della tensione V_{GS} nel tempo nell'arco dell'intero step stress con corrente fissata pari a $-2 \mu A$. Si vuole, infatti, osservare la variazione di V_{GS} in relazione con eventuali manifestazioni di guasto del dispositivo nel tempo.

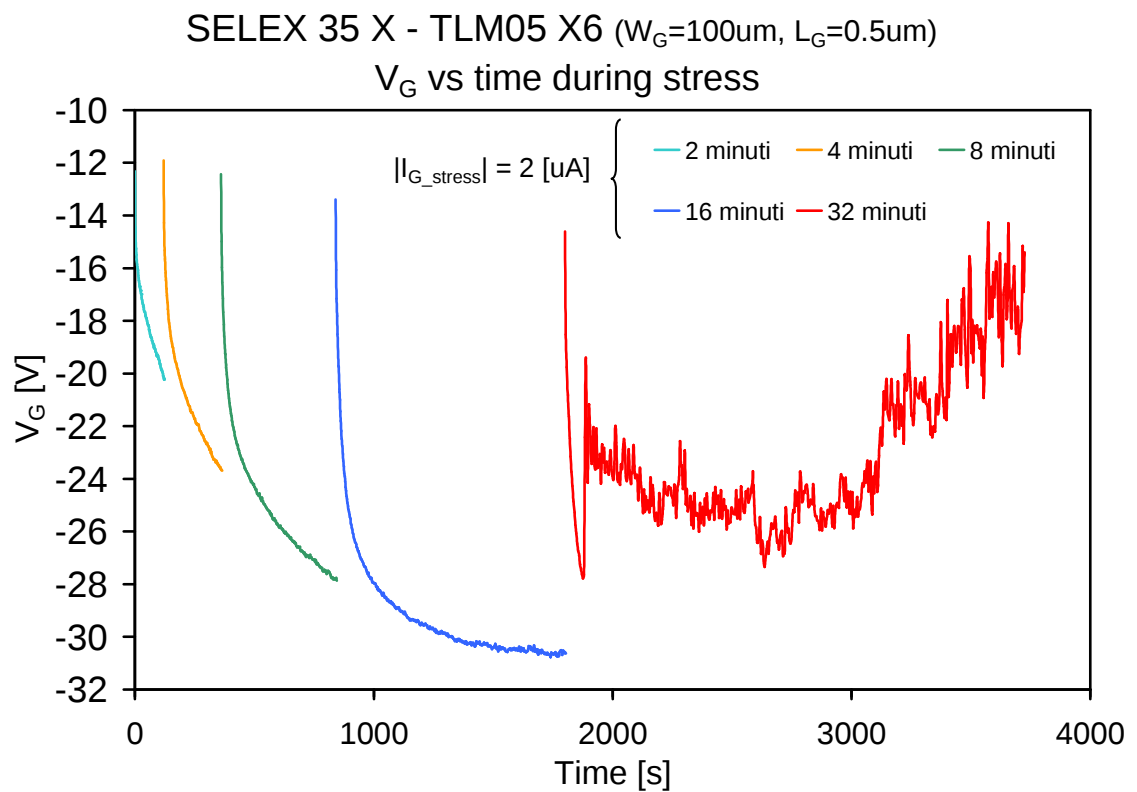


Figura 5.28: Transitorio della V_{GS} su TLM05 X6 durante lo stress in corrente (prima parte).

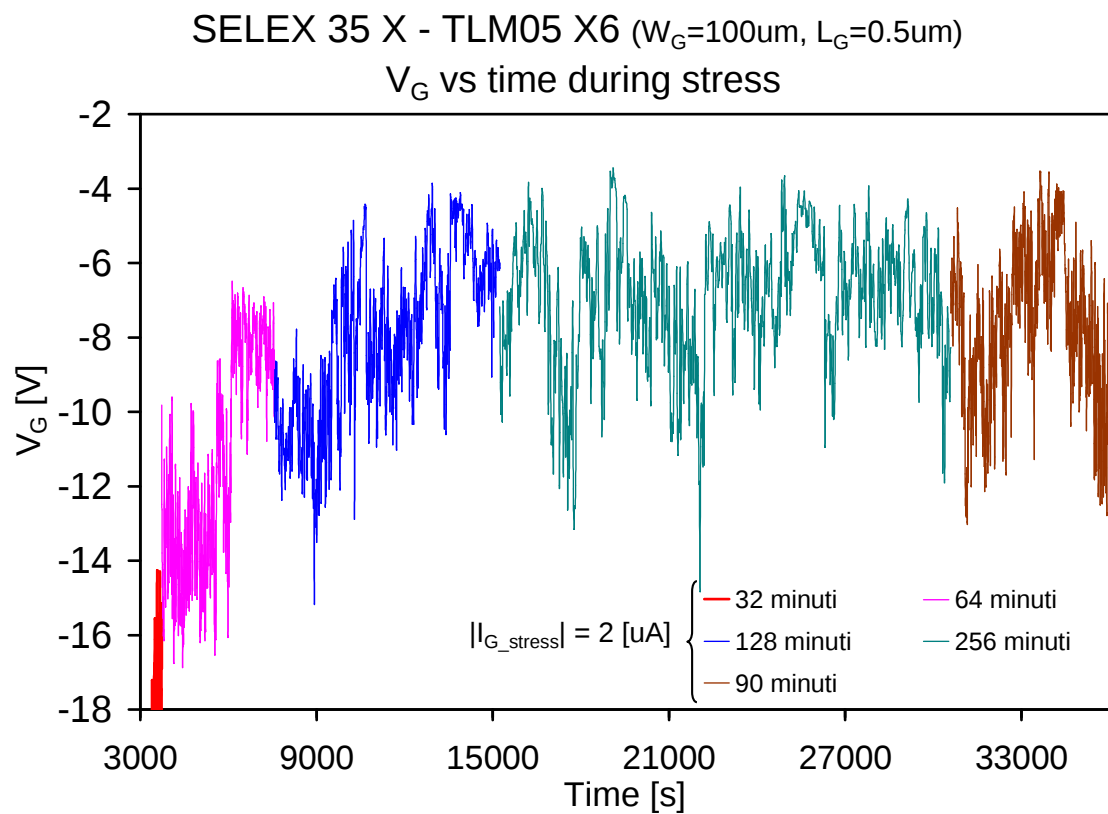
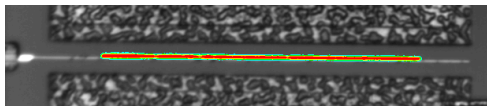


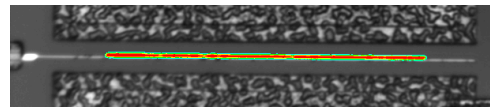
Figura 5.29: Transitorio della V_{GS} su TLM05 X6 durante stress in corrente (seconda parte).

Infine in Figura 5.30, 5.31 e 5.32 si riportano le immagini di emissioni rispettivamente nelle condizioni di:

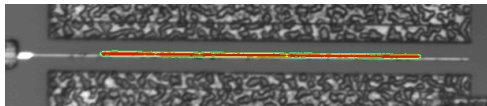
- **ON:** canale aperto; tempo di esposizione 5 s, $V_G = 0$ V, $V_{DS} = 10$ V, $V_S = 0$ V.
- **OFF:** canale chiuso; tempo di esposizione 240 s, $V_{GS} = -10$ V, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.
- **Stress:** durante lo stress; tempi di esposizione 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 90 minuti, $I_{GS} = -2$ μ A, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.



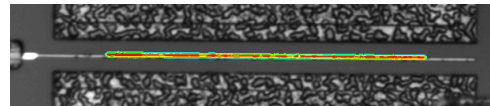
(a) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -1$ μ A (tempo di stress = 120 s).



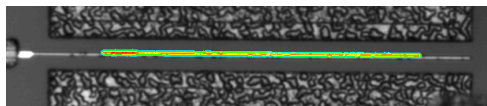
(b) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 120 s).



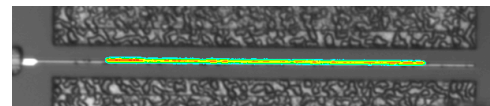
(c) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 240 s).



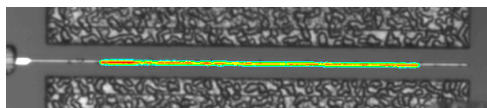
(d) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 480 s).



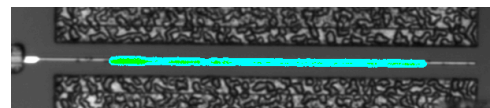
(e) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 960 s).



(f) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 1920 s).



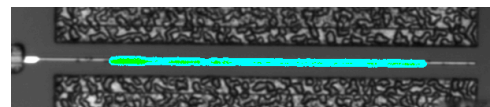
(g) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 3840 s).



(h) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 7680 s).

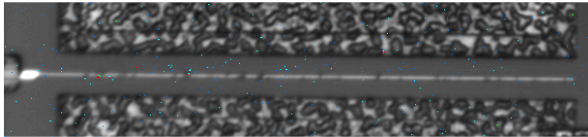


(i) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 15360 s).

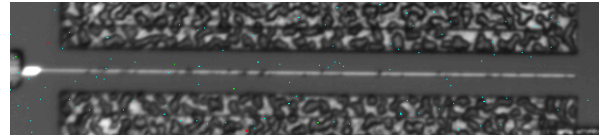


(j) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 5400 s).

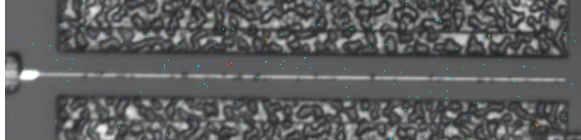
Figura 5.30: Emissioni in “ON state” su TLM05 X6 nel corso dello *step stress* in corrente.



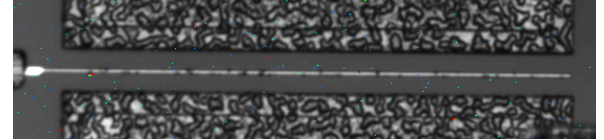
(a) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -1$ μ A (tempo di stress = 120 s).



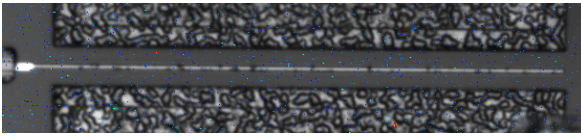
(b) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 120 s).



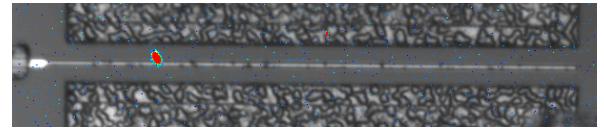
(c) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 240 s).



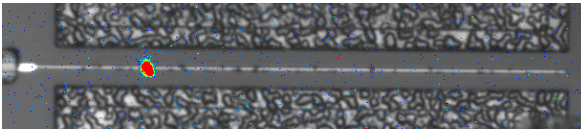
(d) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 480 s).



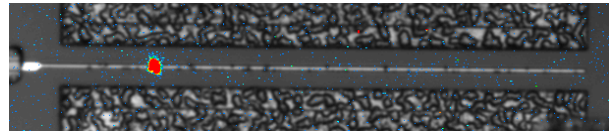
(e) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 960 s).



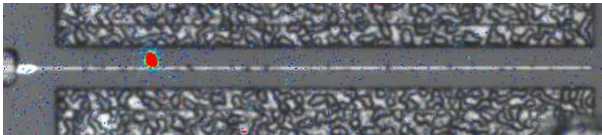
(f) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 1920 s).



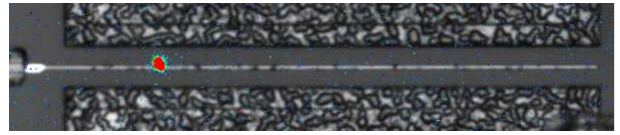
(g) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 3840 s).



(h) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 7680 s).



(i) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 15360 s).



(j) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 5400 s).

Figura 5.31: Emissioni in “OFF state” su TLM05 X6 nel corso dello *step stress* in corrente.

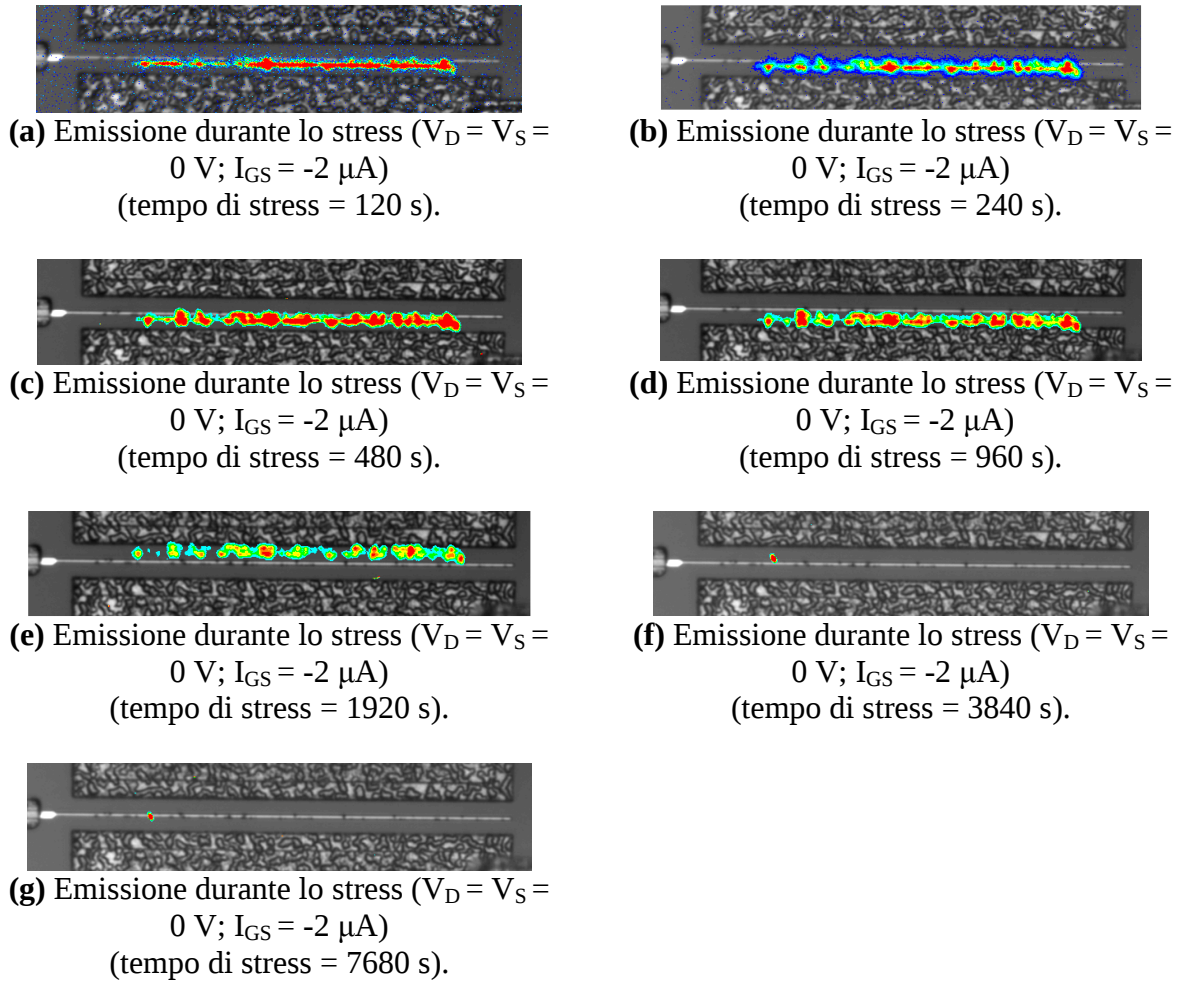


Figura 5.32: Emissioni durante lo stress su TLM05 X6.

Considerazioni

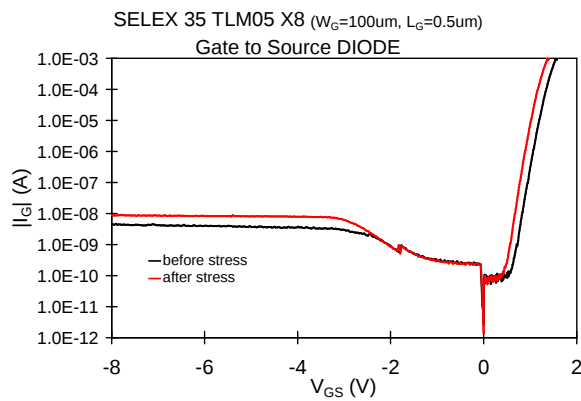
Dalle Figure 5.24 e 5.25 si nota un aumento di un ordine di grandezza della corrente di leakage dei diodi gate-source e gate-drain ed il classico spostamento della tensione di soglia. Dalle variazioni dei parametri DC durante lo stress (Figure 5.26 e 5.27) si può notare che vi è stato un aumento delle correnti di leakage (Figura 5.26(c) e 5.26(d)) e delle correnti dei diodi gate-source e gate-drain (Figura 5.26(e) e 5.26(f)) dopo lo step di 32 minuti (ovvero dopo circa mezz'ora dall'inizio dello stress a -2 μ A), a cui corrisponde una tensione media V_{GS} di circa -28 V (Figura 5.28). Dopo questo step, infatti, si crea uno spot di fotoni emessi in condizioni di dispositivo spento (Figura 5.31(f)) che rimane fino alla fine dello stress. Questo significa che si è verificata una rottura brusca del dispositivo ed il passaggio di corrente si concentra nel punto indicato dallo spot rosso sia in condizioni di "OFF state" sia durante lo stress. Conseguentemente la tensione V_{GS} cala in modulo e diviene rumorosa nel tempo (Figure 5.28 e 5.29) perché il dispositivo, a partire da quel momento, necessita di un minore campo elettrico per far passare la stessa corrente. Inoltre dalle Figure 5.27(c) e 5.27(d) si

possono vedere le stesse correlazioni di degrado del dispositivo, tra la tensione media di gate ed il conteggio di fotoni emessi, sia durante lo stress sia durante le emissioni in “OFF state”.

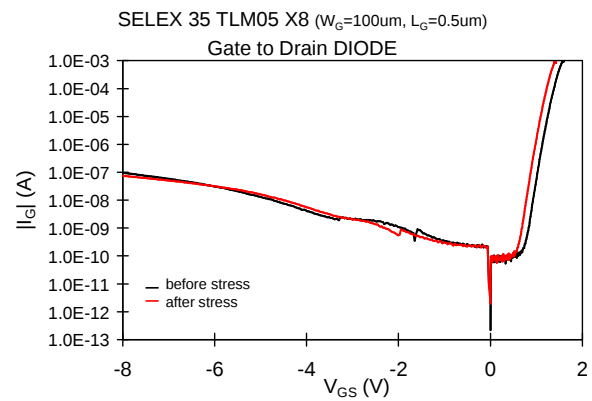
SELEX-35 - TLM05 X8

Diversamente dalle precedenti misurazioni, per alcuni dei dispositivi stressati con la corrente di stress pari a $-2 \mu\text{A}$, non si sono riscontrati particolari segni di degrado. Quindi tali dispositivi sono stati sottoposti a correnti di stress mano a mano più elevate e pari a $-4 \mu\text{A}$, $-6 \mu\text{A}$, $-8 \mu\text{A}$. Nonostante ciò il dispositivo TLM non ha mostrato rotture brusche, bensì è sembrato essersi degradato gradualmente mantenendo pressoché invariati i normali livelli di tensioni e correnti dei dispositivi vergini.

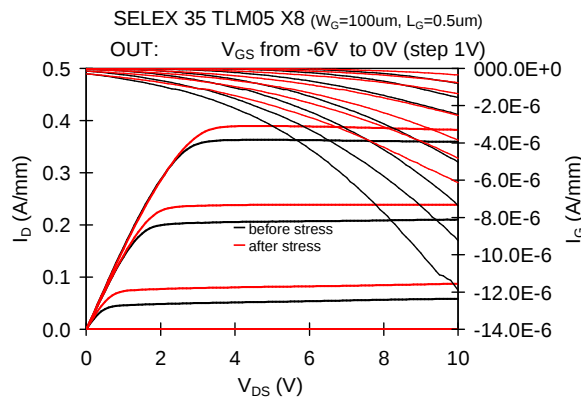
In figura 5.33 e 5.34 sono riportati i confronti tra le caratteristiche DC del dispositivo TLM05 stressato con una corrente di $-1 \mu\text{A}$ e le caratteristiche DC del dispositivo dopo l'ultimo passo di stress a $-2 \mu\text{A}$, per verificare il degrado complessivo avvenuto dopo l'intero *step stress*.



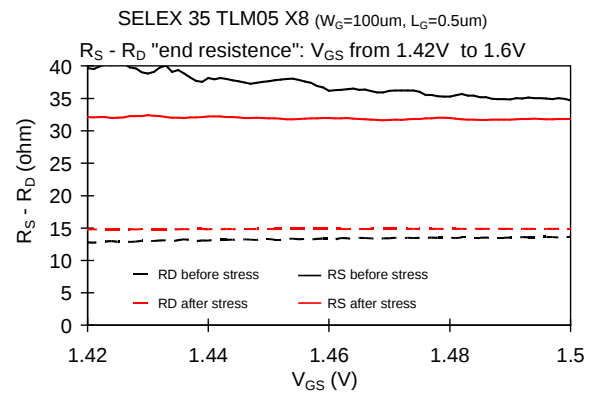
(a) caratteristica I-V del diodo gate-souce.



(b) caratteristica I-V del diodo gate-drain.

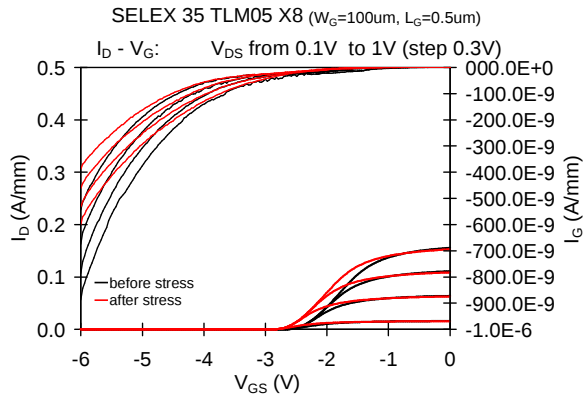


(c) caratteristica $I_{DS} - V_{DS}$ al variare di V_{GS} da -6 V a 0 V .

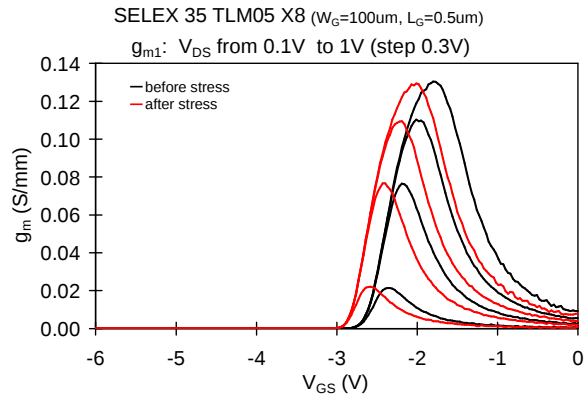


(d) R_S e R_D “end-resistance”.

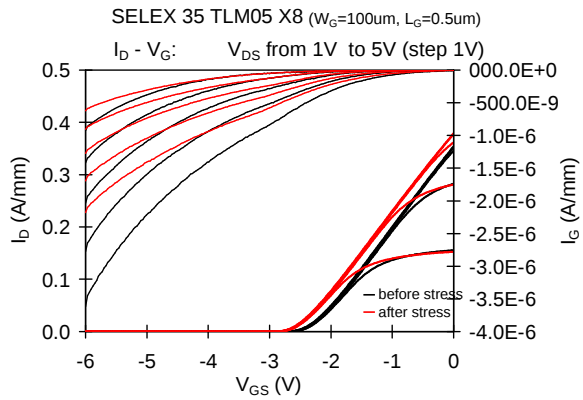
Figura 5.33: Misure DC su TLM05 X8 prima e dopo lo *step stress* in corrente.



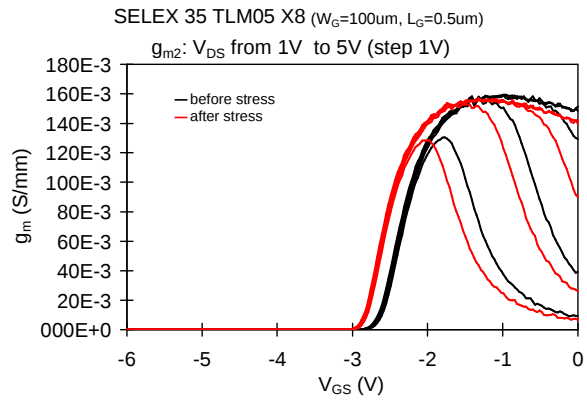
(a) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



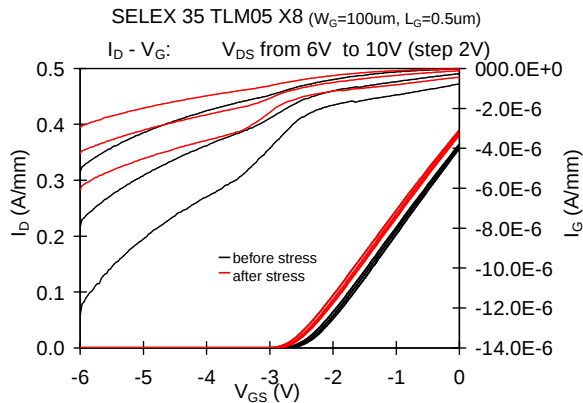
(b) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



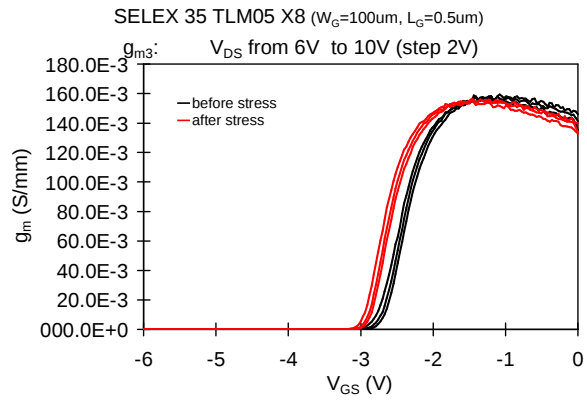
(c) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



(d) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



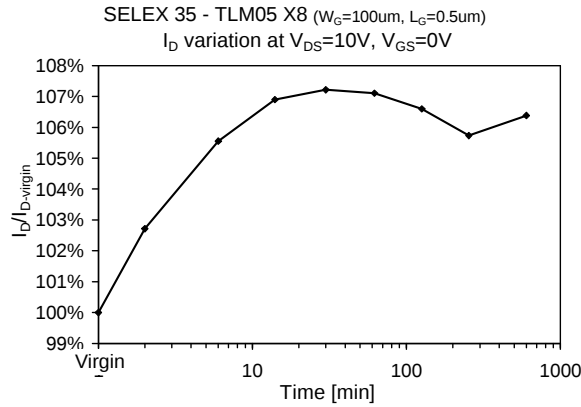
(e) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.



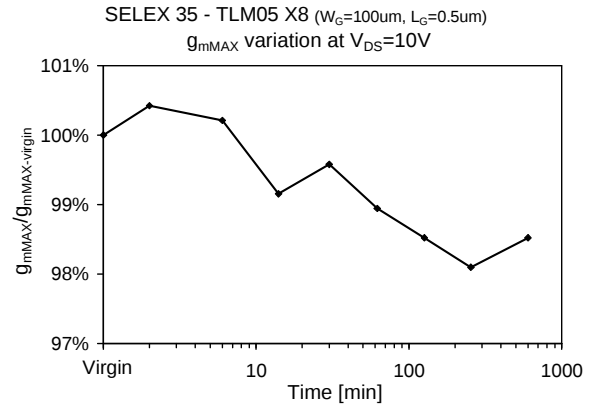
(f) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.

Figura 5.34: Misure DC su TLM05 X8 prima e dopo lo *step stress* in corrente.

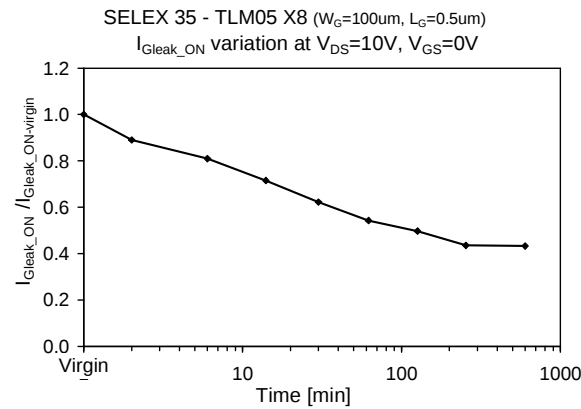
In figura 5.35 e 5.36 sono riportate le variazioni dei principali parametri DC durante ogni passo dello *step stress*.



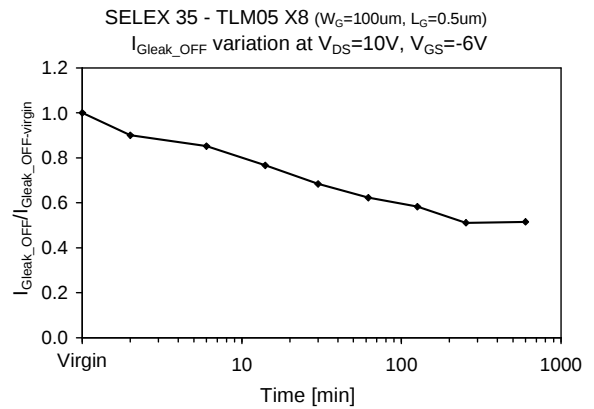
(a) variazione di I_D a $V_{DS} = 10\text{V}$ e $V_{GS} = 0\text{V}$ durante lo stress.



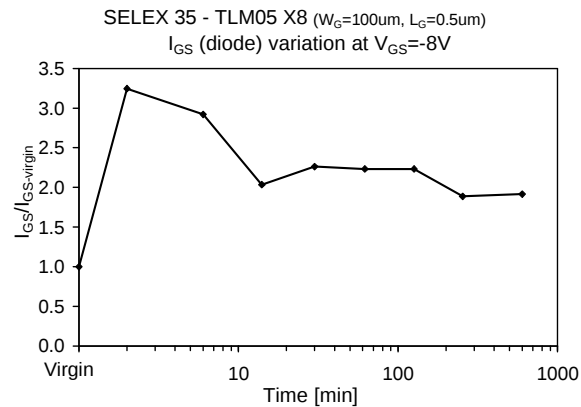
(b) variazione di g_{mMAX} a $V_{DS} = 10\text{V}$ durante lo stress.



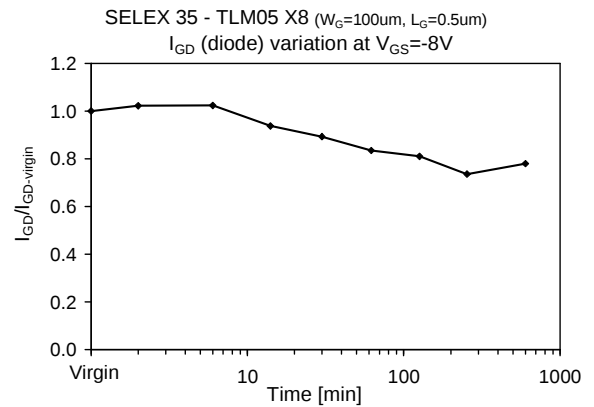
(c) variazione di I_{Gleak_ON} a $V_{DS} = 10\text{V}$ e $V_{GS} = 0\text{V}$ durante lo stress.



(d) variazione di I_{Gleak_OFF} a $V_{DS} = 10\text{V}$ e $V_{GS} = -6\text{V}$ durante lo stress.



(e) variazione della corrente del diodo gate-source durante lo stress.



(f) variazione della corrente del diodo gate-drain durante lo stress.

Figura 5.35: Variazioni parametri DC su TLM05 X8 durante lo *step stress* in corrente.

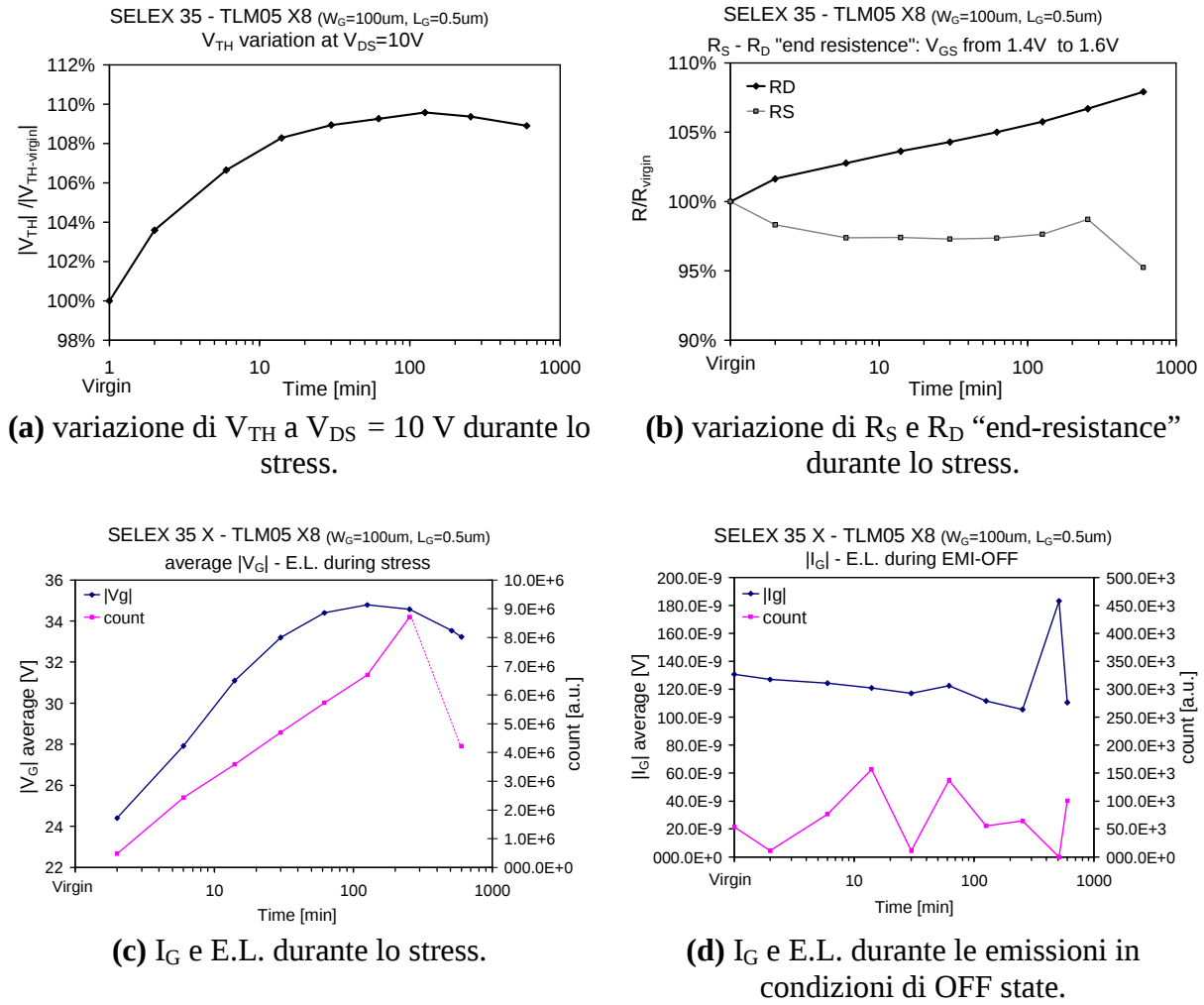


Figura 5.36: Variazioni parametri DC su TLM05 X8 durante lo *step stress* in corrente.

Di seguito si riportano gli andamenti della tensione V_{GS} nel tempo nell'arco dell'intero step stress con corrente fissata pari a $-2 \mu A$. Si vuole, infatti, osservare la variazione di V_{GS} in relazione con eventuali guasti comparsi sul dispositivo nel tempo.

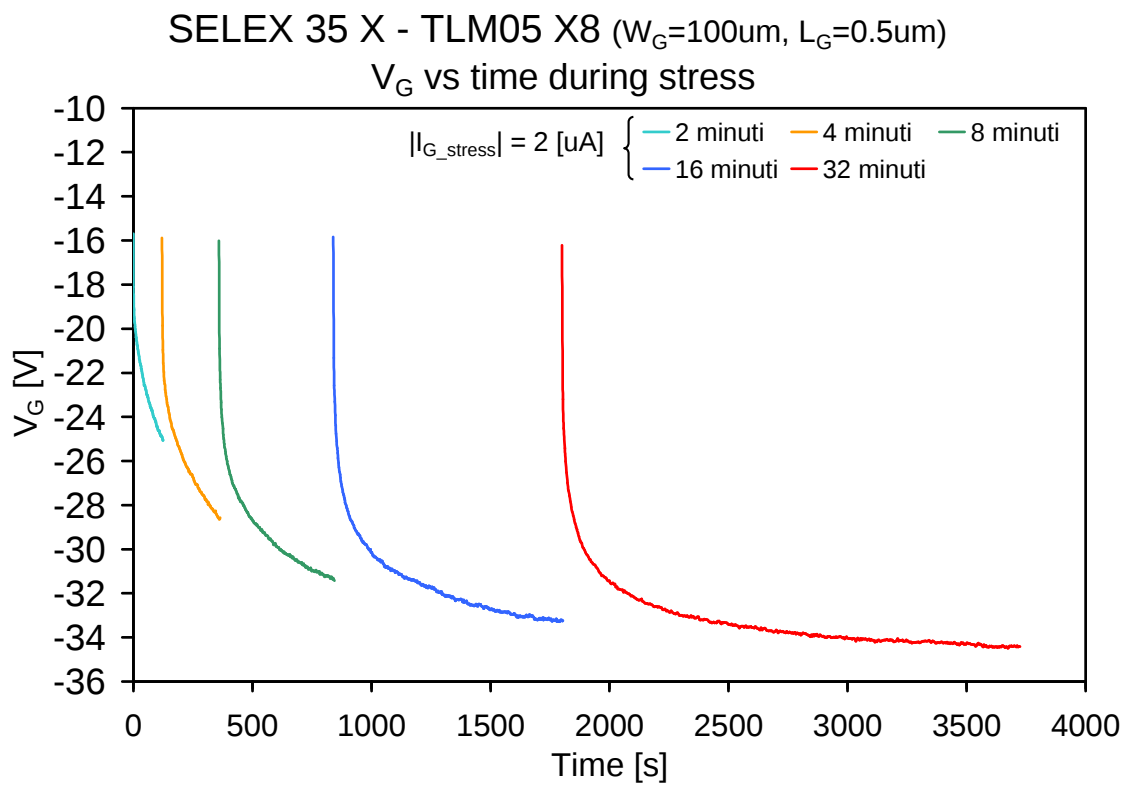


Figura 5.37: Transitorio della V_{GS} su TLM05 X8 durante lo stress in corrente (prima parte).

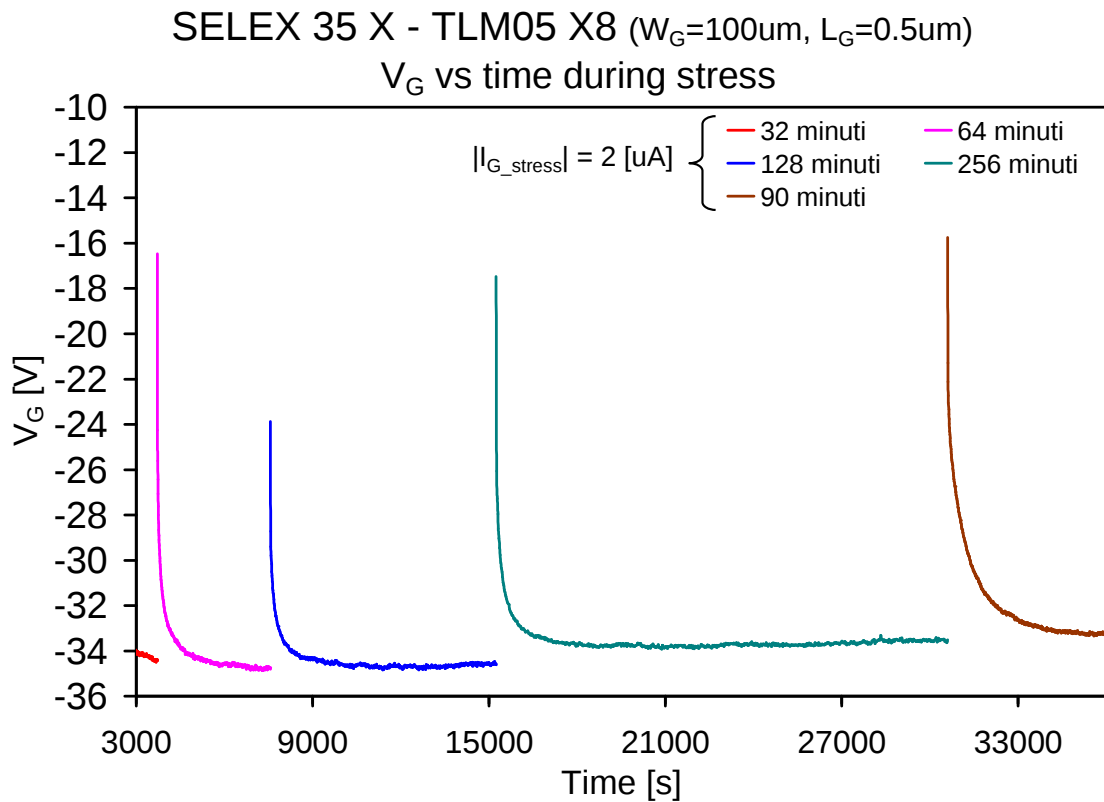
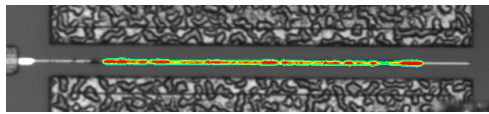


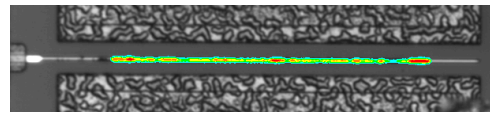
Figura 5.38: Transitorio della V_{GS} su TLM05 X8 durante stress in corrente (seconda parte).

Infine in Figura 5.39, 5.40 e 5.41 si riportano le immagini di emissioni rispettivamente nelle condizioni di:

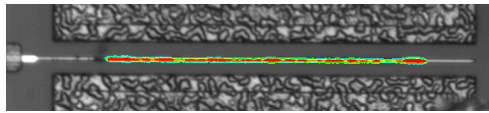
- **ON:** canale aperto; tempo di esposizione 5 s, $V_G = 0$ V, $V_{DS} = 10$ V, $V_S = 0$ V.
- **OFF:** canale chiuso; tempo di esposizione 240 s, $V_{GS} = -10$ V, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.
- **Stress:** durante lo stress; tempi di esposizione 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 90 minuti, $I_{GS} = -2$ μ A, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.



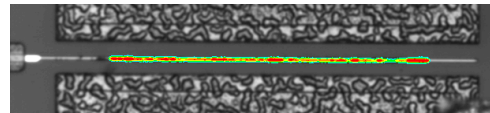
(a) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -1$ μ A (tempo di stress = 120 s).



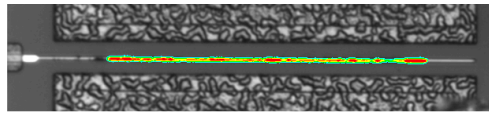
(b) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 120 s).



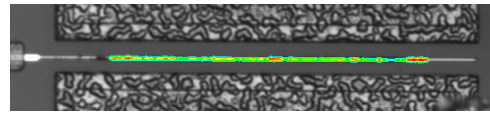
(c) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 240 s).



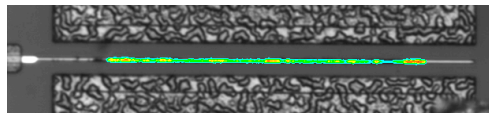
(d) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 480 s).



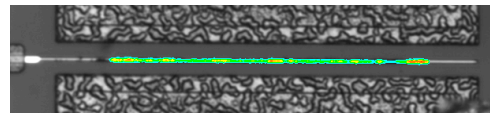
(e) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 960 s).



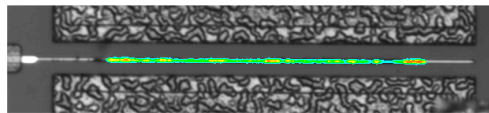
(f) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 1920 s).



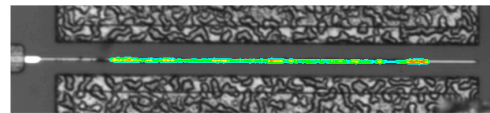
(g) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 3840 s).



(h) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 7680 s).

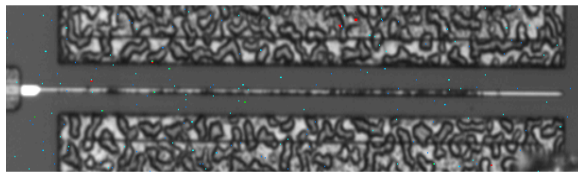


(i) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 15360 s).

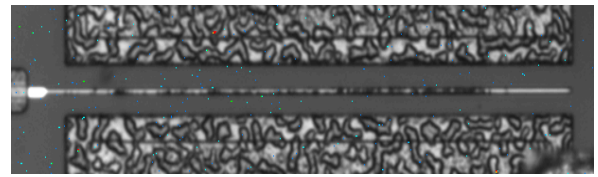


(j) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 5400 s).

Figura 5.39: Emissioni in “ON state” su TLM05 X8 nel corso dello *step stress* in corrente.

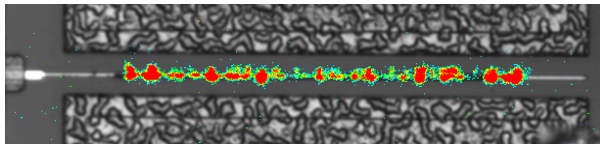


(a) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -1$ μ A (tempo di stress = 120 s).

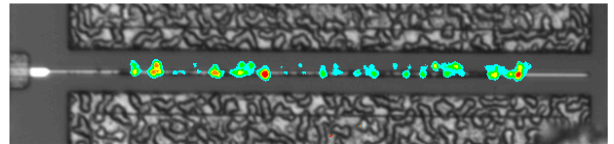


(b) Emissione in OFF state ($V_D = V_S = 0$ V; $V_{GS} = -10$ V), dopo lo step a $I_{GS} = -2$ μ A (tempo di stress = 5400 s).

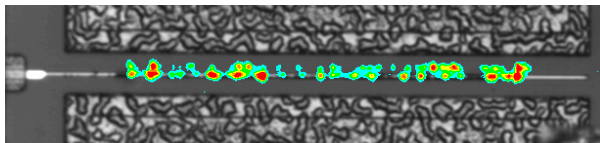
Figura 5.40: Emissioni in “OFF state” su TLM05 X8 nel corso dello *step stress* in corrente.



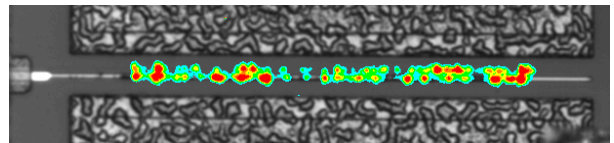
(a) Emissione durante lo stress ($V_D = V_S = 0$ V; $I_{GS} = -2$ μ A) (tempo di stress = 120 s).



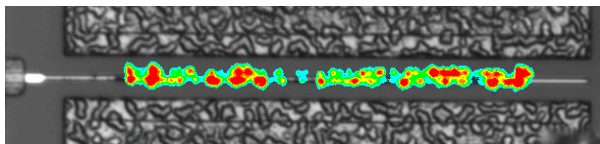
(b) Emissione durante lo stress ($V_D = V_S = 0$ V; $I_{GS} = -2$ μ A) (tempo di stress = 240 s).



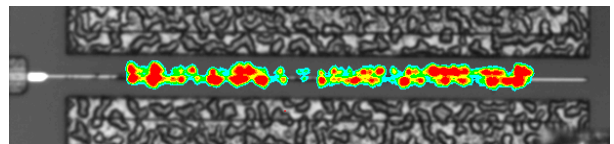
(c) Emissione durante lo stress ($V_D = V_S = 0$ V; $I_{GS} = -2$ μ A) (tempo di stress = 480 s).



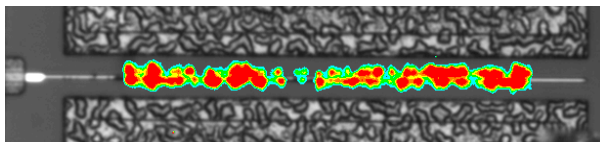
(d) Emissione durante lo stress ($V_D = V_S = 0$ V; $I_{GS} = -2$ μ A) (tempo di stress = 960 s).



(e) Emissione durante lo stress ($V_D = V_S = 0$ V; $I_{GS} = -2$ μ A) (tempo di stress = 1920 s).



(f) Emissione durante lo stress ($V_D = V_S = 0$ V; $I_{GS} = -2$ μ A) (tempo di stress = 3840 s).



(g) Emissione durante lo stress ($V_D = V_S = 0$ V; $I_{GS} = -2$ μ A) (tempo di stress = 7680 s).

Figura 5.41: Emissioni durante lo stress su TLM05 X8.

Per lo stesso dispositivo stressato precedentemente (TLM05 X8) si riportano i risultati ottenuti per la corrente di stress $I_{GS} = -8 \mu A$. Il dispositivo TLM ha mostrato solamente un degrado graduale mantenendo pressoché invariati i normali livelli di tensioni e correnti dei dispositivi vergini. L'unica variazione rilevante è una minima traslazione della tensione di conduzione del dispositivo verso tensioni più elevate.

In figura 5.42 e 5.43 sono riportati i confronti tra le caratteristiche DC del dispositivo TLM05 stressato con una corrente di $-6 \mu A$ e le caratteristiche DC del dispositivo dopo l'ultimo passo di stress a $-8 \mu A$, per verificare il degrado complessivo avvenuto dopo l'intero *step stress*.

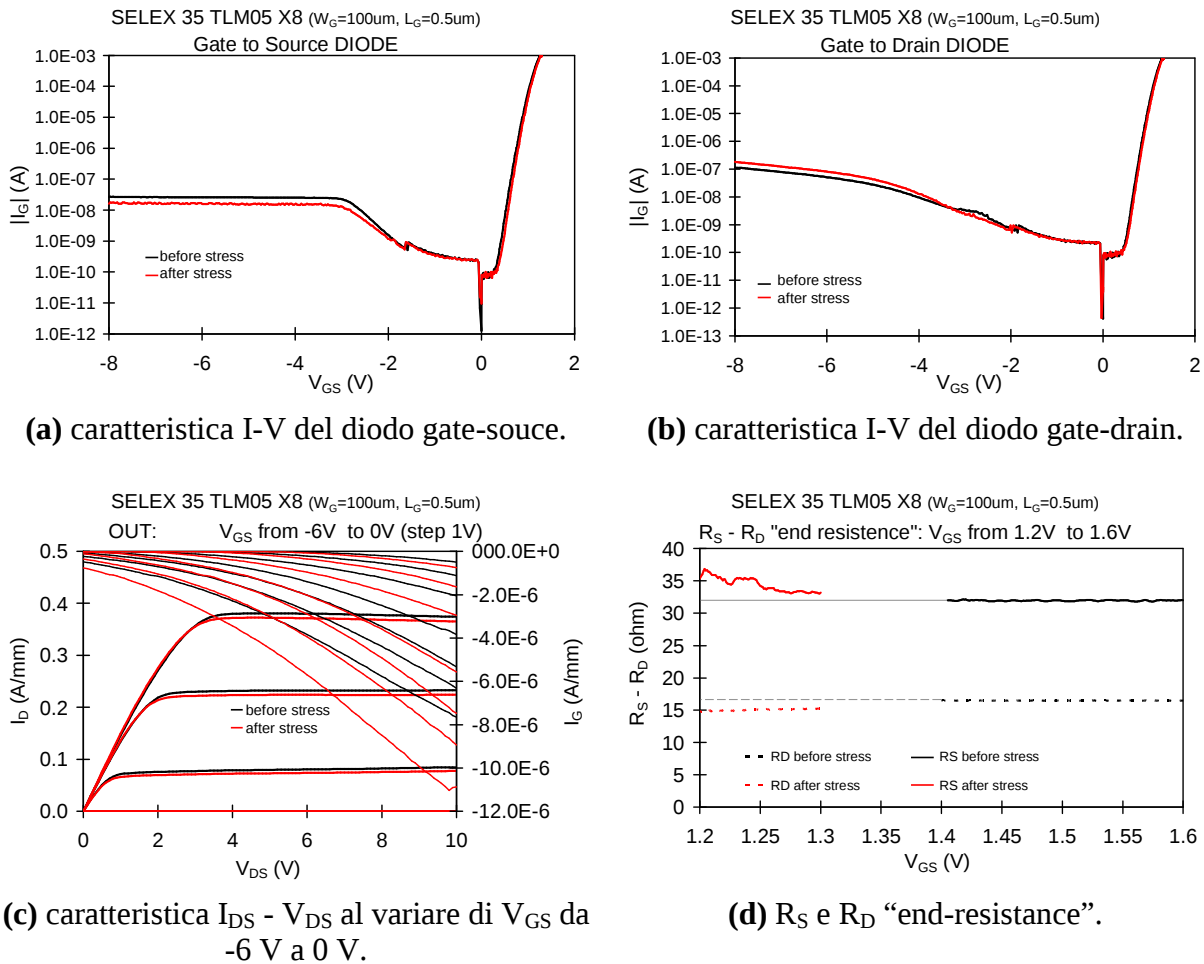
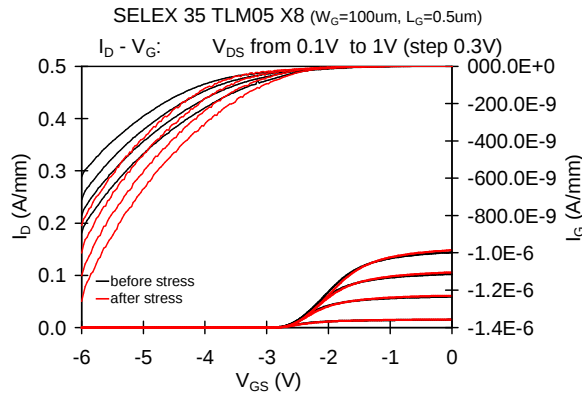
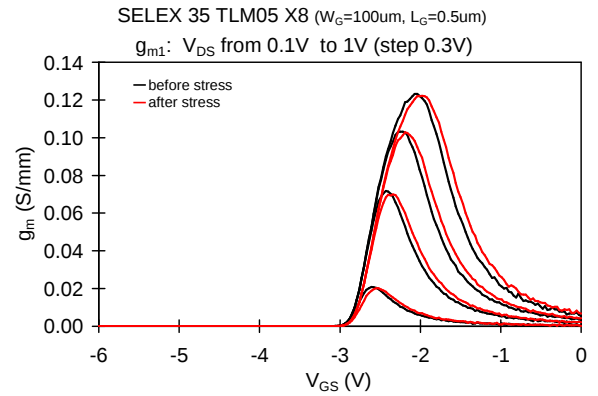


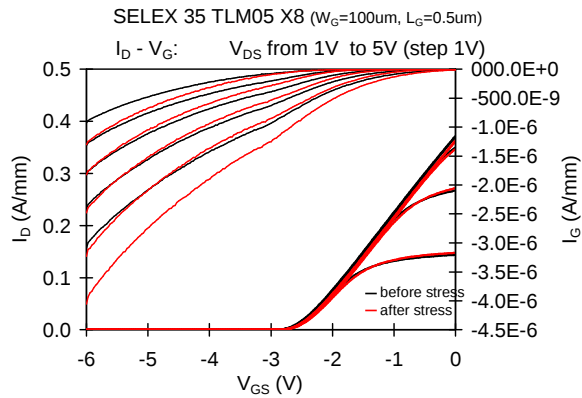
Figura 5.42: Misure DC su TLM05 X8 prima e dopo lo *step stress* in corrente.



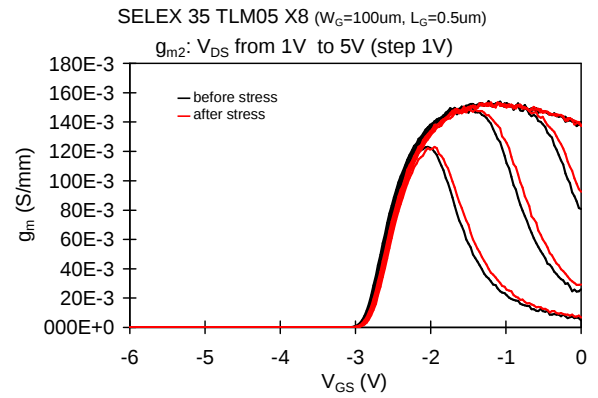
(a) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



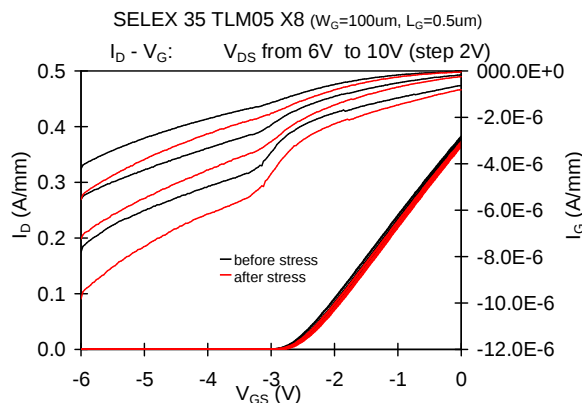
(b) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



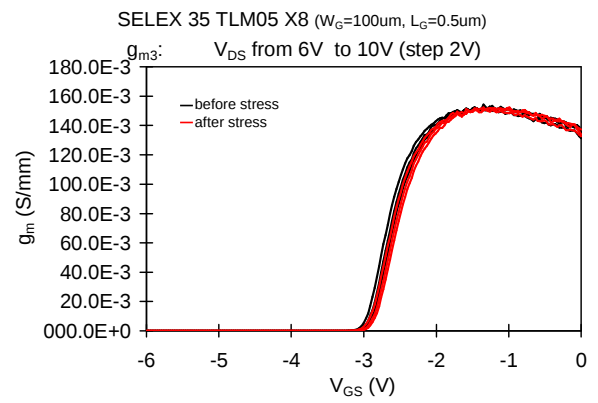
(c) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



(d) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



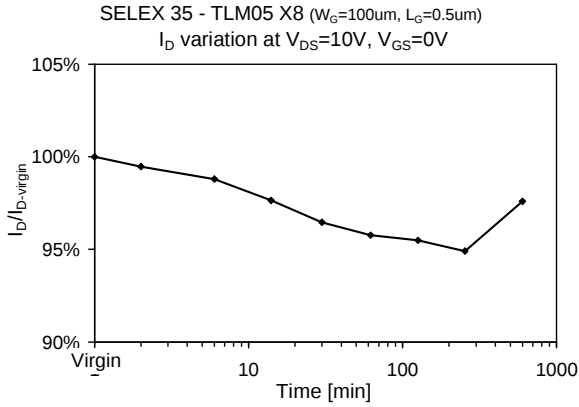
(e) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.



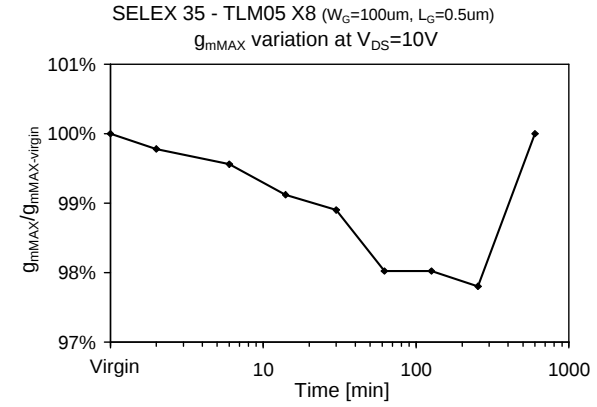
(f) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.

Figura 5.43: Misure DC su TLM05 X8 prima e dopo lo *step stress* in corrente.

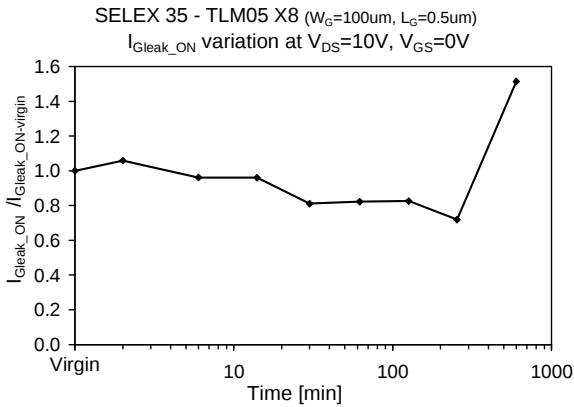
In figura 5.44 e 5.45 sono riportate le variazioni dei principali parametri DC durante ogni passo dello *step stress*.



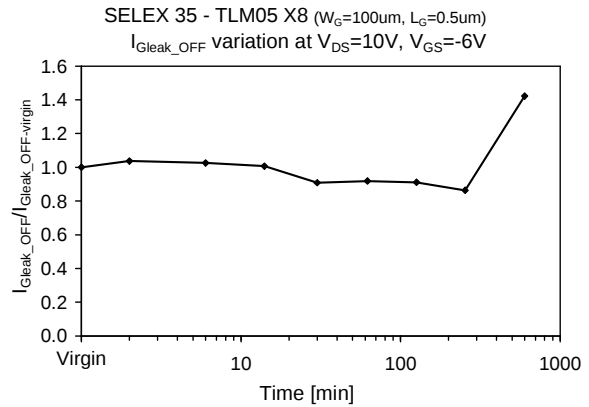
(a) variazione di I_D a $V_{DS} = 10\text{ V}$ e $V_{GS} = 0\text{ V}$ durante lo stress.



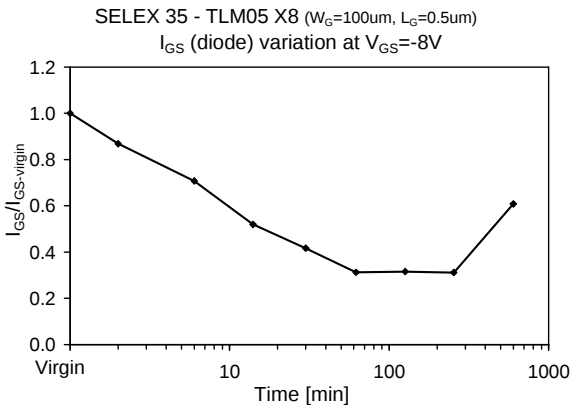
(b) variazione di g_{mMAX} a $V_{DS} = 10\text{ V}$ durante lo stress.



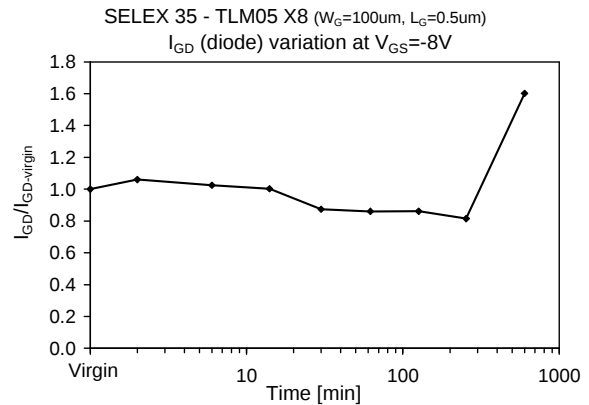
(c) variazione di I_{Gleak_ON} a $V_{DS} = 10\text{ V}$ e $V_{GS} = 0\text{ V}$ durante lo stress.



(d) variazione di I_{Gleak_OFF} a $V_{DS} = 10\text{ V}$ e $V_{GS} = -6\text{ V}$ durante lo stress.

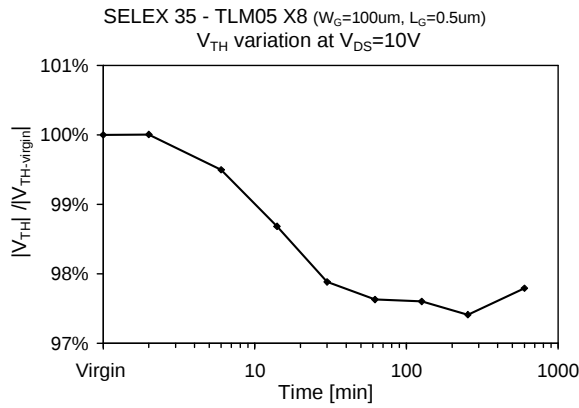


(e) variazione della corrente del diodo gate-source durante lo stress.

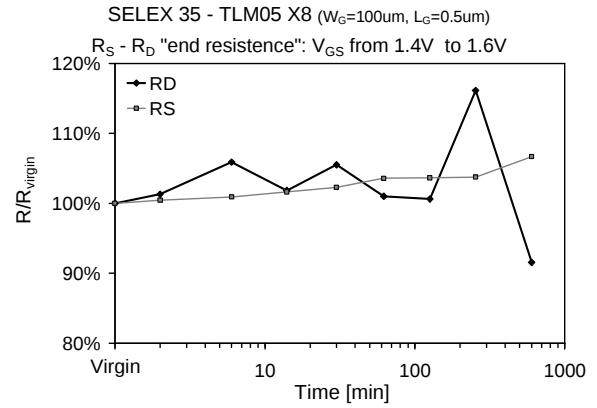


(f) variazione della corrente del diodo gate-drain durante lo stress.

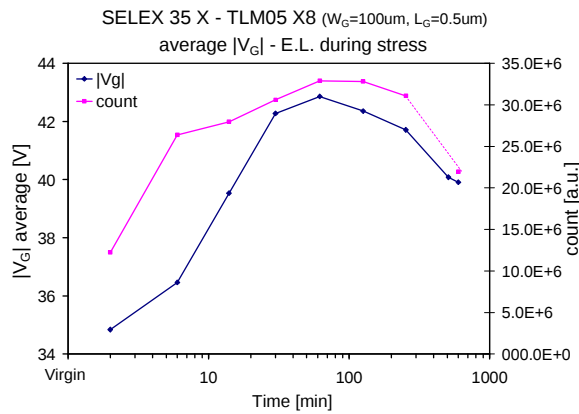
Figura 5.44: Variazioni parametri DC su TLM05 X8 durante lo *step stress* in corrente.



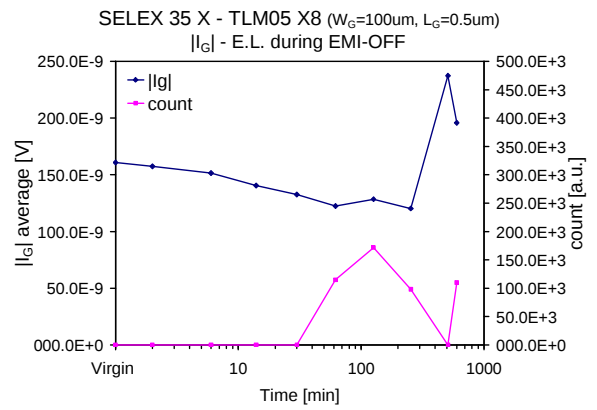
(a) variazione di V_{TH} a $V_{DS} = 10 V$ durante lo stress.



(b) variazione di R_S e R_D "end-resistance" durante lo stress.



(c) I_G e E.L. durante lo stress.



(d) I_G e E.L. durante le emissioni in condizioni di OFF state.

Figura 5.45: Variazioni parametri DC su TLM05 X8 durante lo *step stress* in corrente.

Di seguito si riportano gli andamenti della tensione V_{GS} nel tempo nell'arco dell'intero step stress con corrente fissata pari a $-8 \mu A$. Si vuole, infatti, osservare la variazione di V_{GS} in relazione con eventuali manifestazioni di degrado del dispositivo nel tempo.

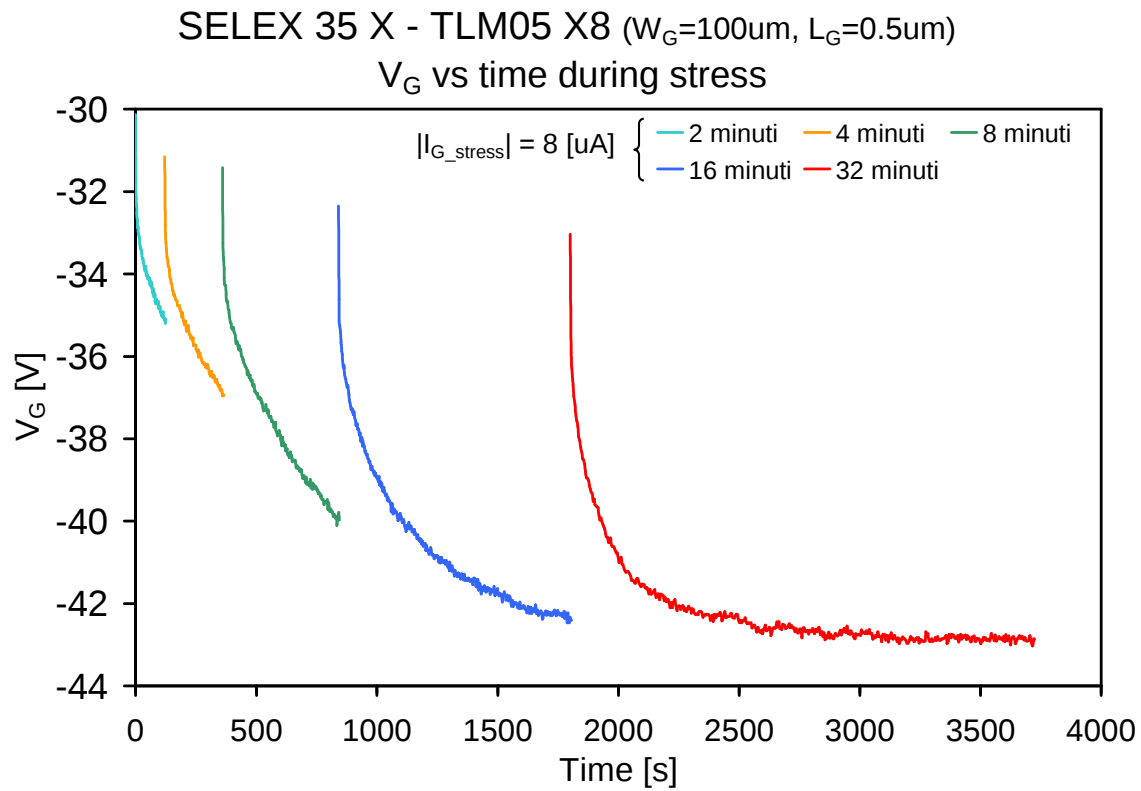


Figura 5.46: Transitorio della V_{GS} su TLM05 X8 durante lo stress in corrente (prima parte).

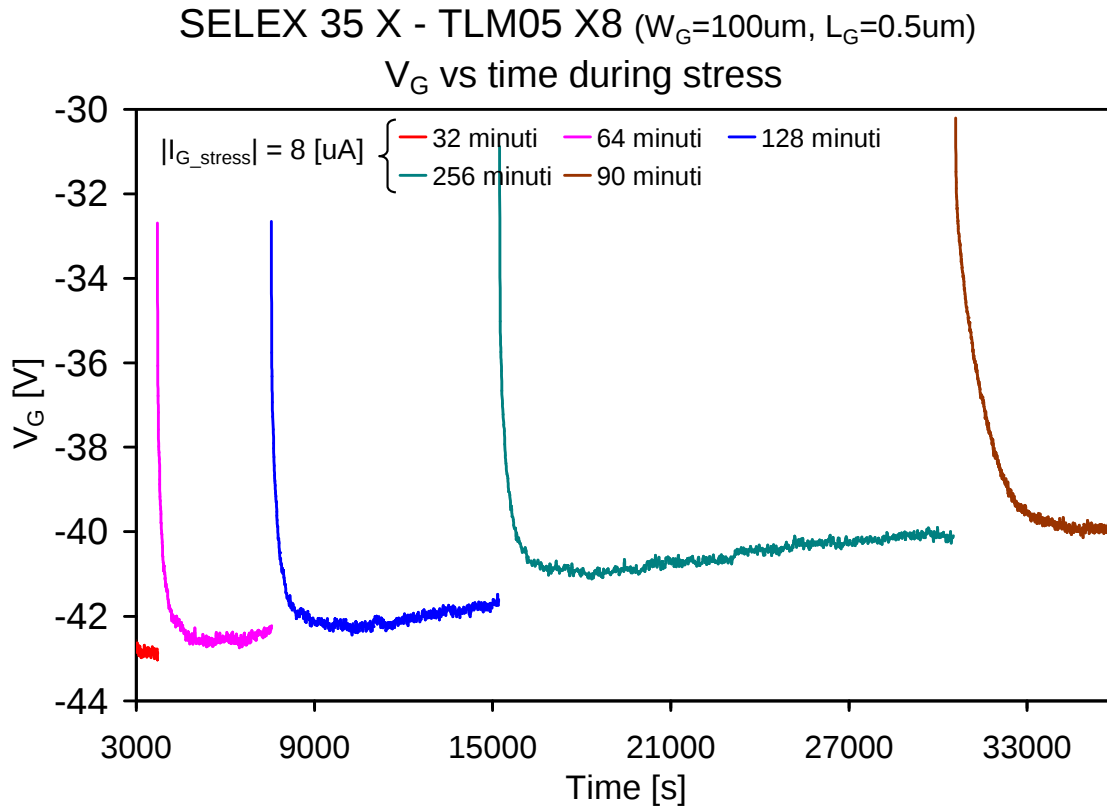
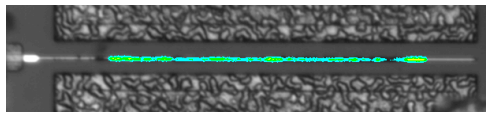


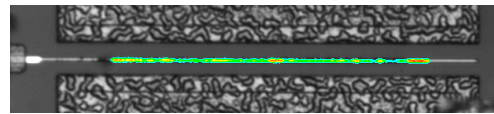
Figura 5.47: Transitorio della V_{GS} su TLM05 X8 durante stress in corrente (seconda parte).

Infine in Figura 5.48, 5.49 e 5.50 si riportano le immagini di emissioni rispettivamente nelle condizioni di:

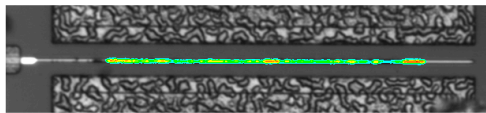
- **ON:** canale aperto; tempo di esposizione 5 s, $V_G = 0$ V, $V_{DS} = 10$ V, $V_S = 0$ V.
- **OFF:** canale chiuso; tempo di esposizione 240 s, $V_{GS} = -10$ V, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.
- **Stress:** durante lo stress; tempi di esposizione 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 90 minuti, $I_{GS} = -8$ μ A, $V_D = 0$ V, $V_S = 0$ V.



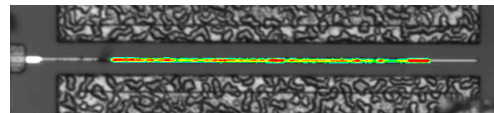
(a) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -6$ μ A (tempo di stress = 120 s).



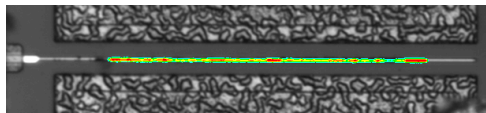
(b) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -8$ μ A (tempo di stress = 120 s).



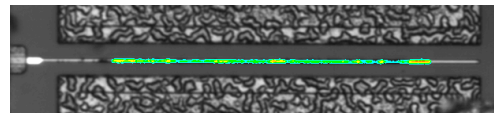
(c) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -8$ μ A (tempo di stress = 240 s).



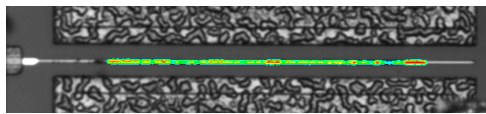
(d) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -8$ μ A (tempo di stress = 480 s).



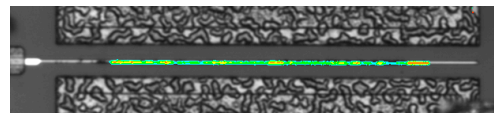
(e) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -8$ μ A (tempo di stress = 960 s).



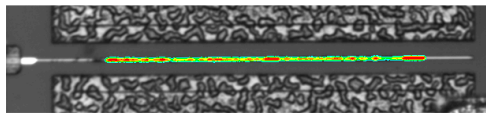
(f) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -8$ μ A (tempo di stress = 1920 s).



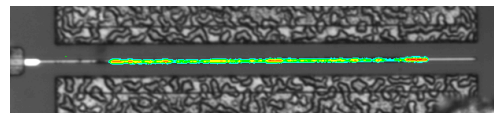
(g) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -8$ μ A (tempo di stress = 3840 s).



(h) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -8$ μ A (tempo di stress = 7680 s).



(i) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -8$ μ A (tempo di stress = 15360 s).



(j) Emissione in ON state ($V_{DS} = 10$ V; $V_{GS} = 0$ V); dopo lo step a $I_{GS} = -8$ μ A (tempo di stress = 5400 s).

Figura 5.48: Emissioni in “ON state” su TLM05 X8 nel corso dello *step stress* in corrente.

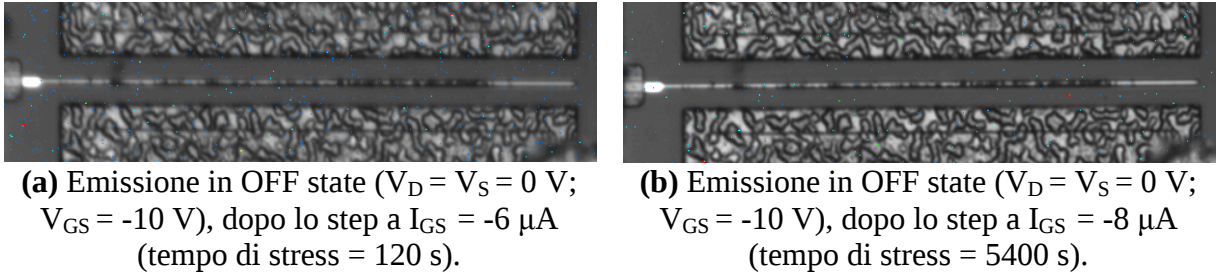


Figura 5.49: Emissioni in “OFF state” su TLM05 X8 nel corso dello *step stress* in corrente.

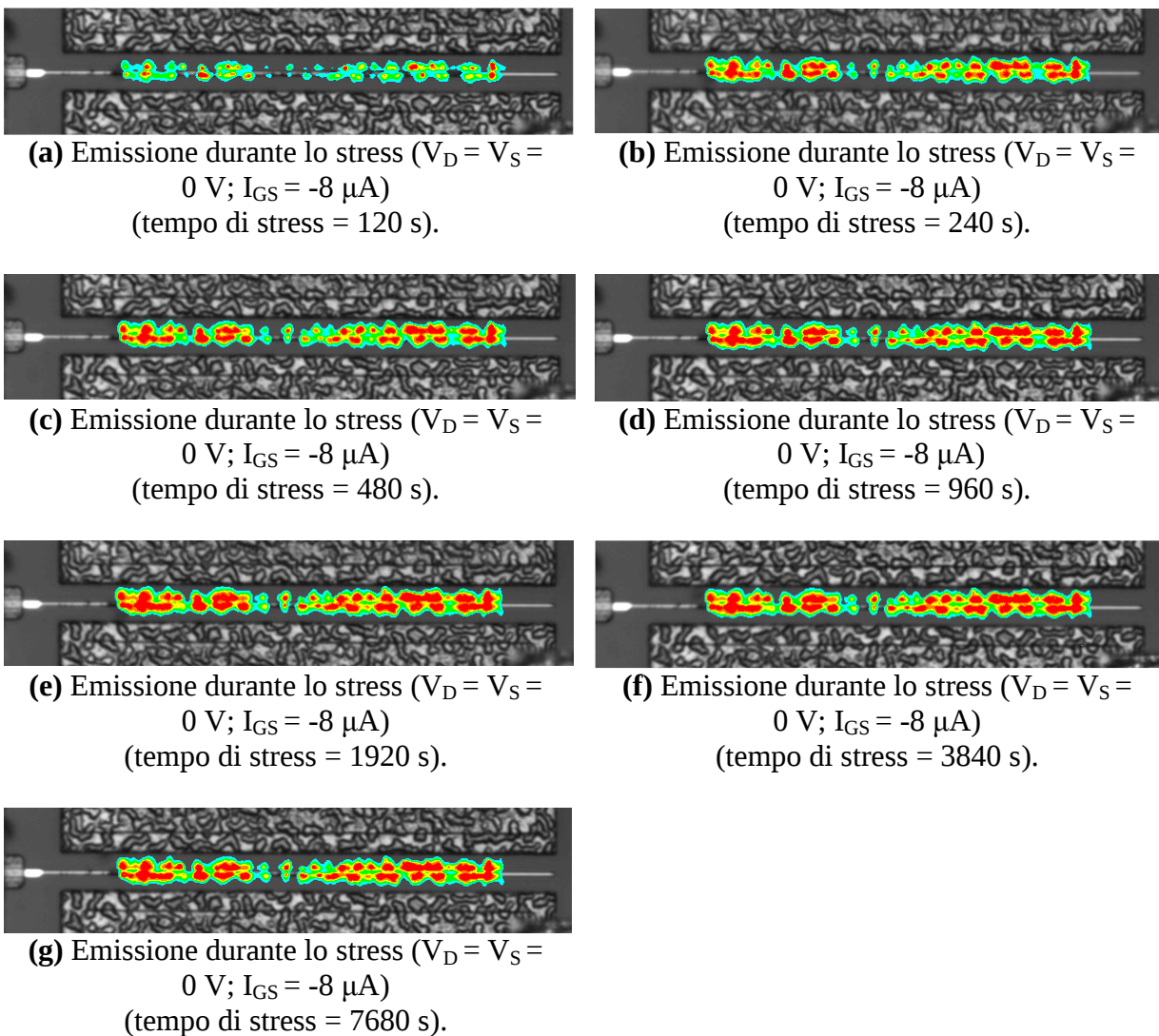


Figura 5.50: Emissioni durante lo stress su TLM05 X8.

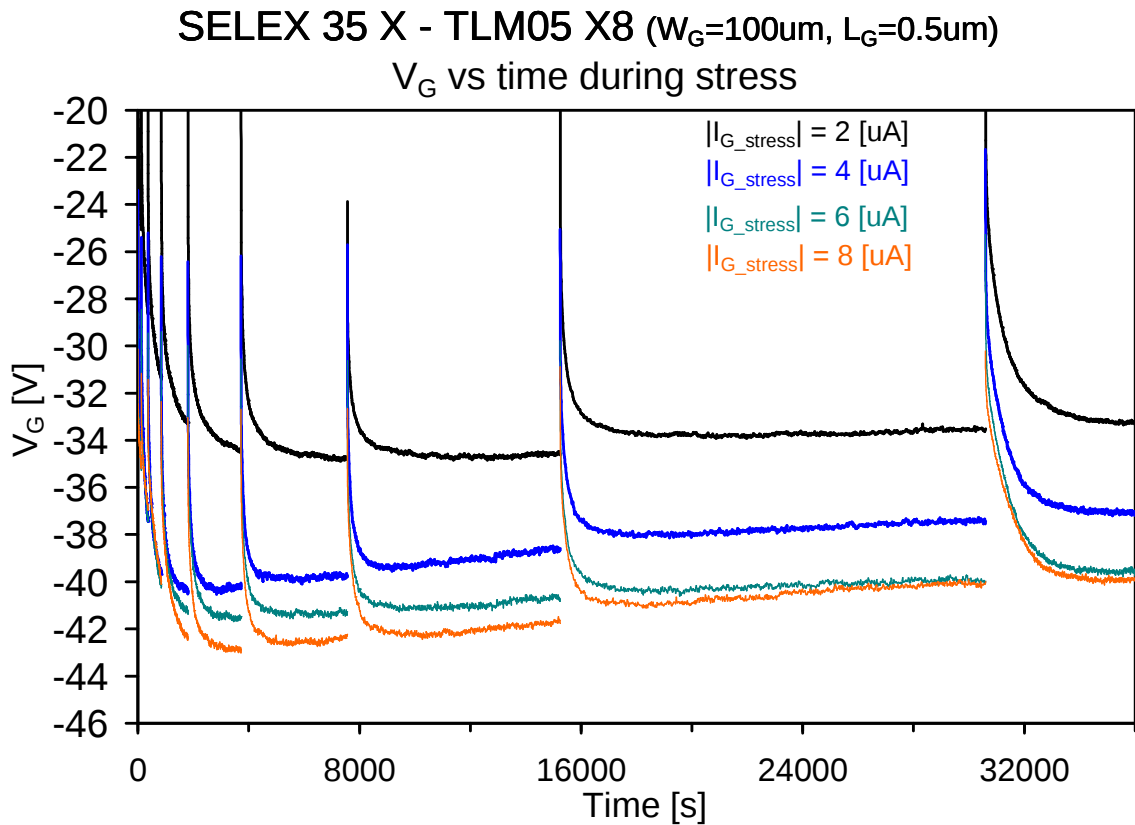


Figura 5.51: Transitori della V_{GS} su TLM05 X8 durante i differenti step stress in corrente.

Considerazioni

Durante i test su questo dispositivo TLM05 X8 non si presentano rilevanti variazioni delle caratteristiche e dei parametri DC dopo lo stress.

Dagli andamenti della tensione V_{GS} nel tempo, durante i vari step stress per le diverse correnti (Figura 5.51), si nota un periodo iniziale di tipo transitorio (dell'ordine di un migliaio di secondi) seguito da un comportamento più stabile e lievemente crescente nel tempo. Questo comportamento potrebbe essere dovuto, per la prima parte (di tipo transitorio), ad un intrappolamento di carica molto lento, mentre per la seconda parte (lievemente crescente nel tempo), ad un progressivo invecchiamento, una volta neutralizzati gli stati trappola. Inoltre, al variare della corrente di stress imposta, a meno dei livelli di tensione, si può evidenziare il fatto che gli andamenti nel tempo sono tra loro molto simili ed i tempi per il raggiungimento del valore minimo di tensione sono tra loro confrontabili.

In condizioni di dispositivo spento "OFF state" (Figure 5.40 e 5.49) non si visualizza alcuna emissione di fotoni, ovvero nessun segno rilevante di degrado. Infine dalle immagini in condizioni di dispositivo acceso "ON state" (Figure 5.39 e 5.48) si vede che l'emissione di fotoni del dispositivo diminuisce progressivamente all'aumentare della corrente di stress I_{GS} .

Viceversa nelle immagini di elettroluminescenza durante lo stress (Figure 5.41 e 5.50) si vede il progressivo incremento delle emissioni all'aumentare della corrente di stress I_{GS} .

SELEX-35 - TLM05 X7

Per il dispositivo TLM05 X7 si riportano i risultati ottenuti a seguito di uno stress con una corrente imposta $I_{GS} = -4 \mu A$, e con un unico tempo di stress pari a 8 ore. Il dispositivo TLM ha mostrato solamente un degrado graduale mantenendo pressoché invariati i normali livelli di tensioni e correnti dei dispositivi vergini. L'unica variazione rilevante è una minima traslazione della tensione di conduzione del dispositivo verso tensioni più elevate.

In figura 5.52 e 5.53 sono riportati i confronti tra le caratteristiche DC del dispositivo TLM05 stressato con una corrente di $-2 \mu A$ e le caratteristiche DC del dispositivo dopo l'ultimo passo di stress a $-4 \mu A$, per verificare il degrado complessivo avvenuto dopo l'intero stress.

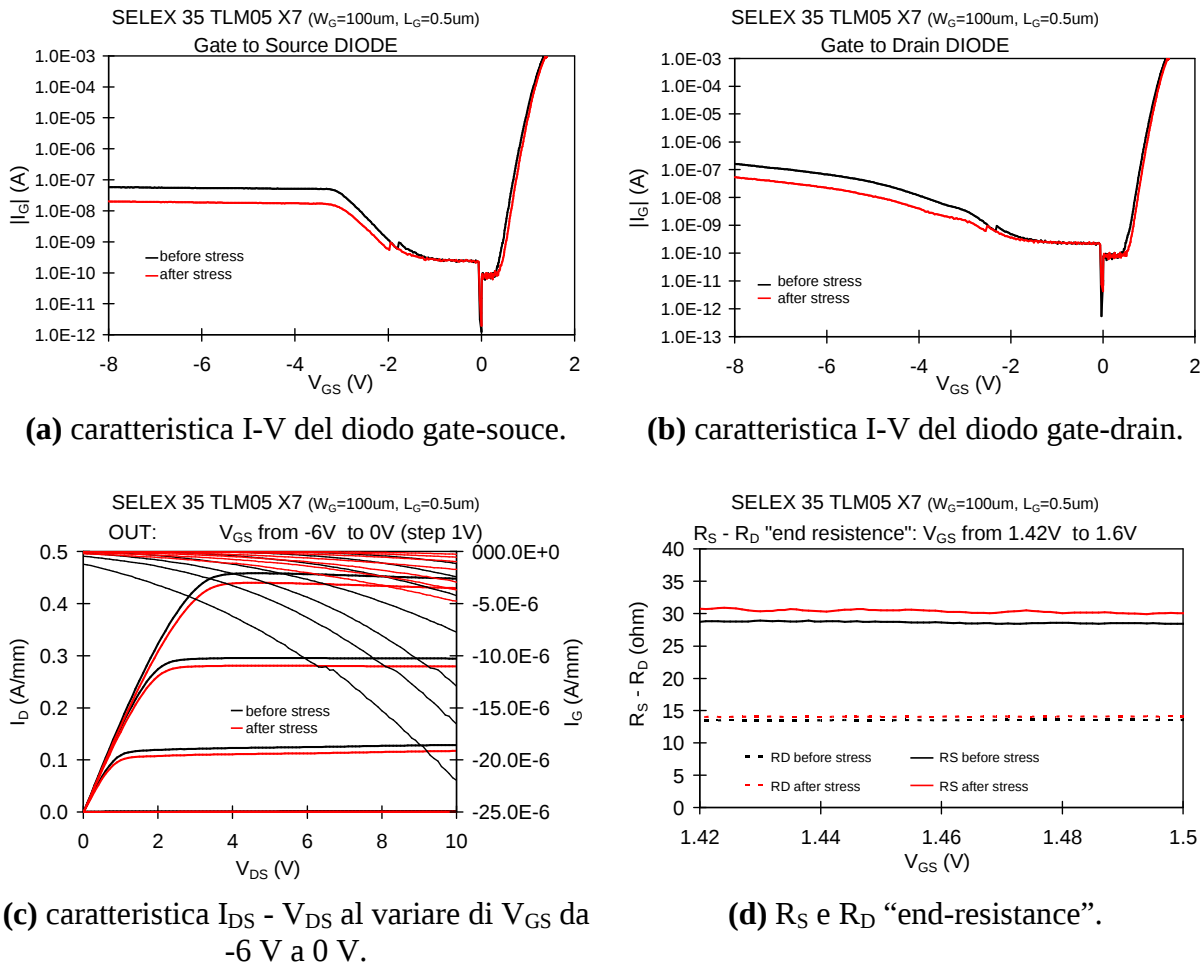
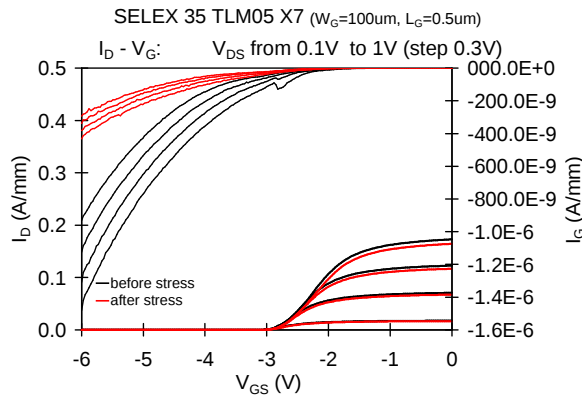
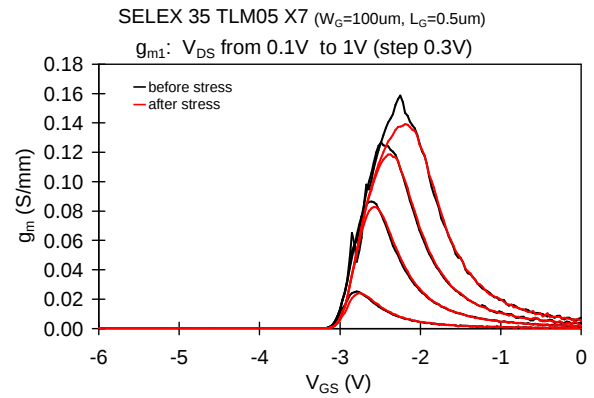


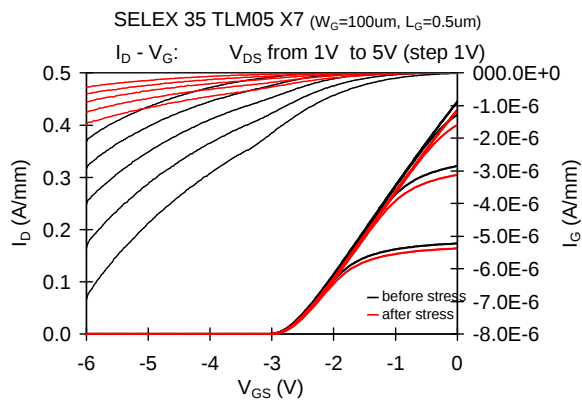
Figura 5.52: Misure DC su TLM05 X7 prima e dopo lo stress in corrente.



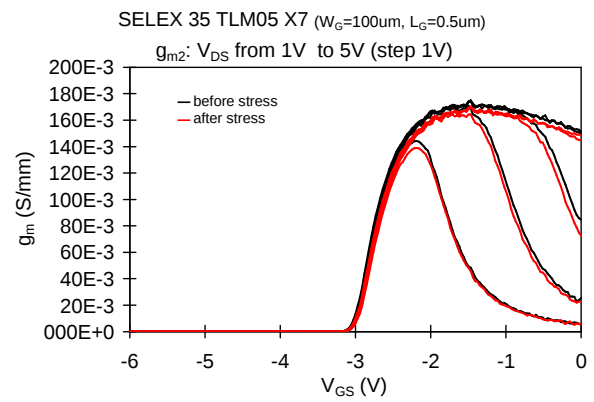
(a) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



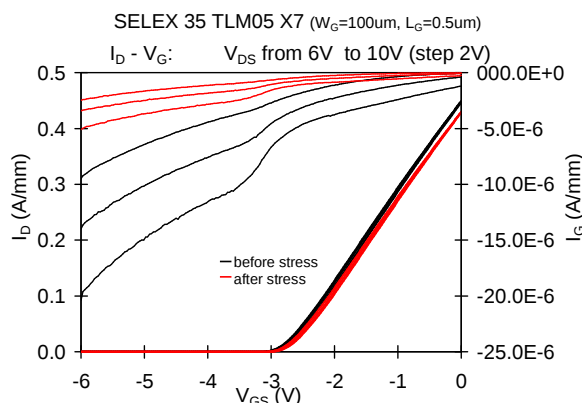
(b) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 0.1 V a 1 V.



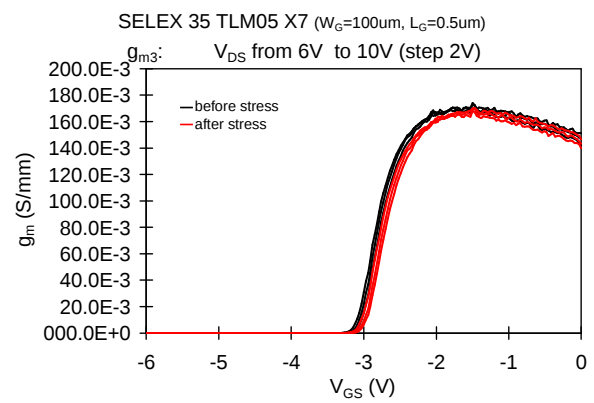
(c) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



(d) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 1 V a 5 V.



(e) caratteristica $I_{DS} - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.



(f) caratteristica $g_m - V_{GS}$ al variare di V_{DS} da 6 V a 10 V.

Figura 5.53: Misure DC su TLM05 X7 prima e dopo lo stress in corrente.

Di seguito si riportano gli andamenti nel tempo della tensione V_{GS} in relazione con le variazioni di elettroluminescenza nel corso dello stress a corrente costante pari a $-4\mu\text{A}$.

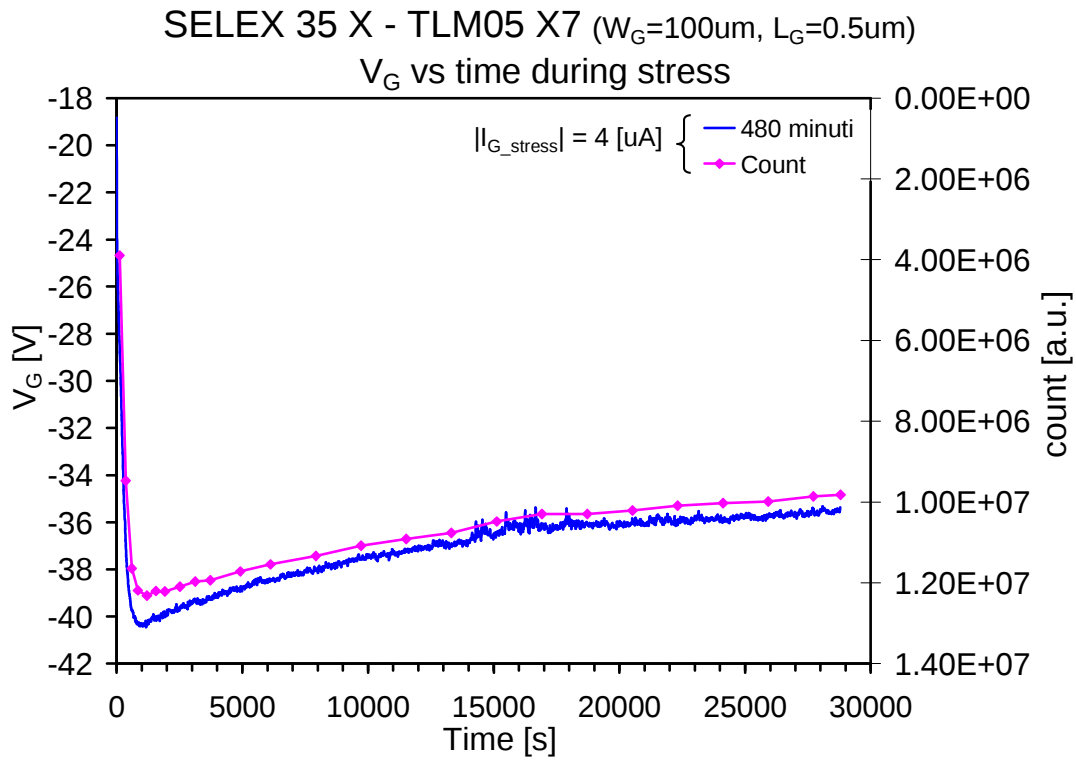


Figura 5.54: Transitorio della V_{GS} in relazione con l'elettroluminescenza su TLM05 X7 durante lo stress in corrente.

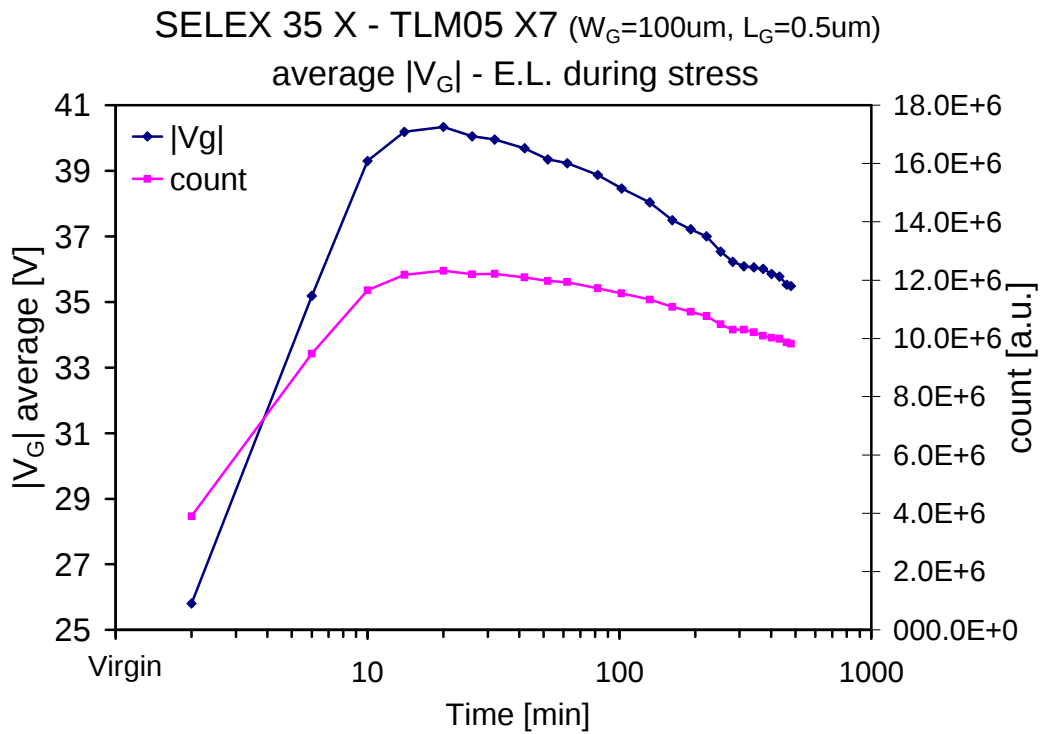


Figura 5.55: Transitorio della V_{GS} media in relazione con l'elettroluminescenza su TLM05 X7 durante stress in corrente.

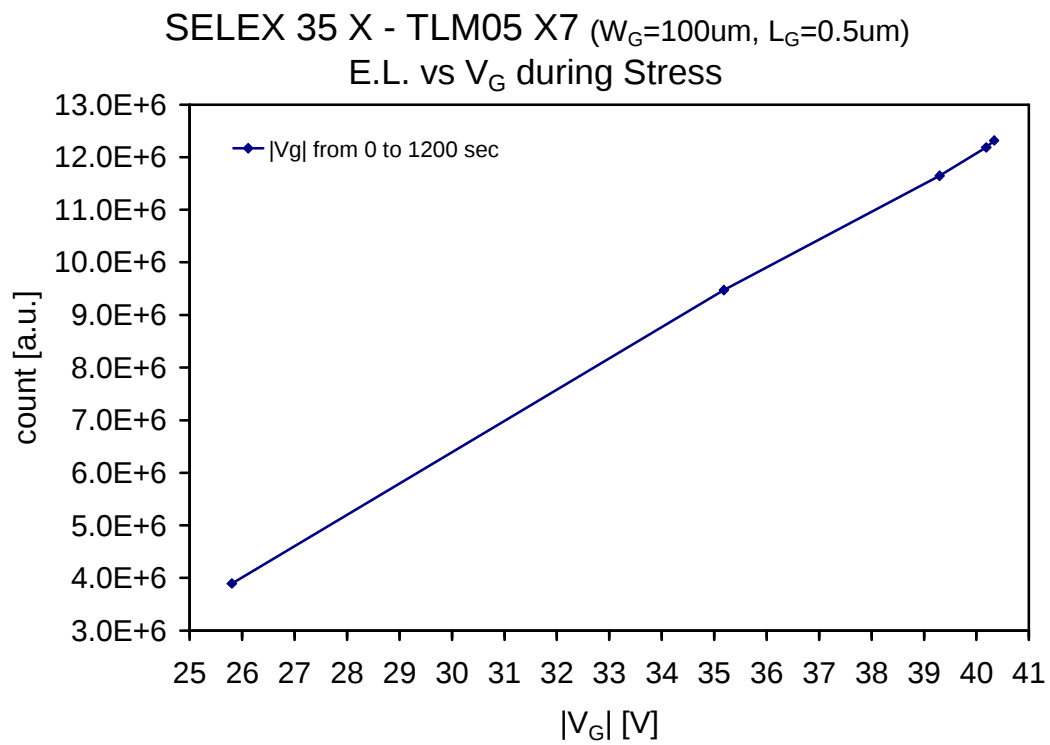


Figura 5.56: Relazione tra l'elettroluminescenza e tensione media V_{GS} su TLM05 X7 (per V_{GS} da 0 a 1200 secondi).

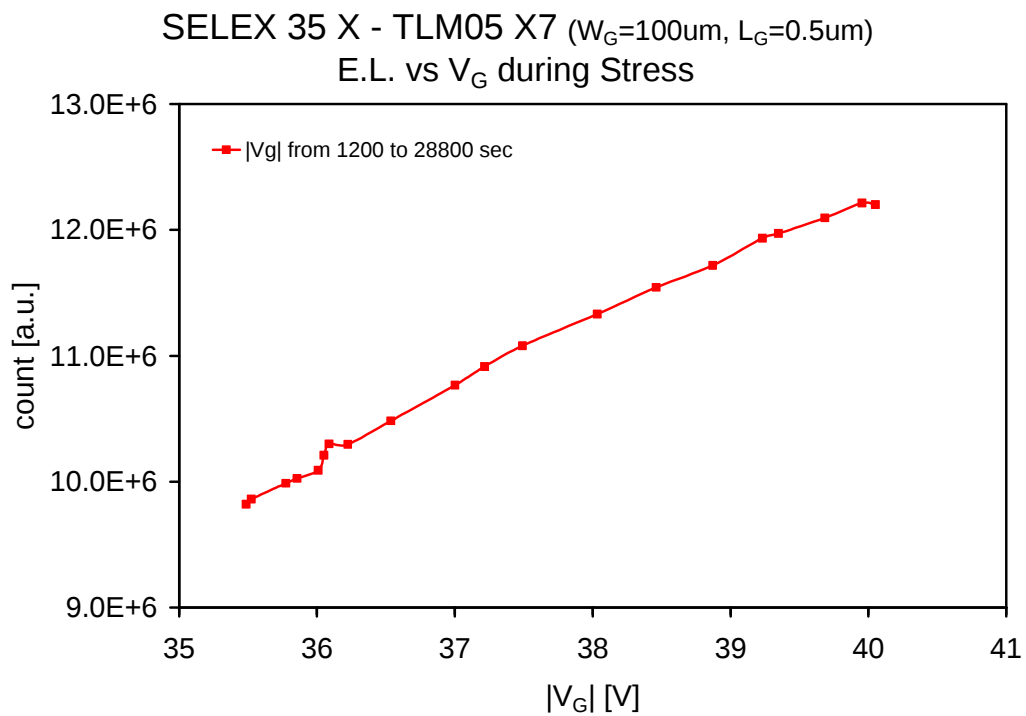


Figura 5.57: Relazione tra l'elettroluminescenza e tensione media V_{GS} su TLM05 X7 (per V_{GS} da 1200 a 28800 secondi).

Considerazioni

Nel corso dello stress, dalle Figure 5.56 e 5.57 si può estrapolare una diretta correlazione tra la tensione di gate e l'elettroluminescenza del dispositivo. A causa dell'aumento in modulo della tensione di gate, durante il transitorio iniziale, gli elettroni necessari per mantenere la corrente imposta di $-4\ \mu\text{A}$ diventano mano a mano più "caldi", ovvero si eccitano per poter sostenere il campo elettrico più elevato. Questo provoca un incremento di emissione dei fotoni. Durante il calo in modulo della tensione di gate, invece, il conteggio di fotoni emessi va diminuendo con l'andamento della tensione di gate stessa.

Come già descritto precedentemente per il dispositivo TLM05 X8, l'intero fenomeno potrebbe essere giustificato da il verificarsi di un lento intrappolamento di carica seguito da un progressivo e graduale invecchiamento una volta neutralizzati gli stati trappola. Ulteriori misure di affidabilità sono necessarie per un migliore inquadramento di tale fenomeno.

Conclusioni

In questa tesi è stata studiata l'affidabilità dei dispositivi HEMT su GaN appartenenti al wafer Selex 35.

Con lo step stress in tensione su dispositivi HEMT si è notato un drastico aumento della corrente I_G a partire da un livello critico di tensione inversa di stress V_G , in concomitanza del quale si riscontra anche un incremento del numero di difetti nella zona di bordo del gate (rilevato con il microscopio ad emissione con dispositivo in condizioni di "OFF-state").

In contrasto con l'elevato incremento della corrente di gate, la degradazione della corrente I_D e della transconduttanza g_m avviene in modo graduale. Questo suggerisce che tali difetti localizzati abbiano una limitata influenza sul trasporto di carica.

La relazione tra incremento della corrente I_G e dell'intensità delle emissioni suggerisce che i due effetti abbiano un'origine comune. Una possibile spiegazione a questo fenomeno è la seguente: quando viene applicata al dispositivo un'alta tensione tra gate e drain, fenomeni di tunneling assistito da trappole favoriscono l'iniezione di elettroni dal gate al semiconduttore attraverso punti preferenziali, quali difetti, che agiscono come livelli profondi (già presenti nel dispositivo non stressato e generati dall'effetto piezoelettrico inverso).

Analogamente a quanto accade per lo step stress in tensione, con lo step stress in corrente su dispositivi HEMT si cominciano a verificare aumenti della corrente di leakage e delle correnti sui diodi gate-source e gate-drain, con conseguente degrado del dispositivo, a partire da una certa corrente di stress (I_G). A questa corrente corrisponde la medesima tensione critica (V_G) riscontrata con lo stress in tensione. Tale degrado si denota dagli spot di emissione in condizioni di dispositivo spento, dal calo di emissione in condizioni di dispositivo acceso e dall'incremento di emissione nel corso dello step stress.

Su alcuni step stress in corrente, condotti su dispositivi TLM05, si è notato che ad una certa corrente di stress iniziano a comparire drastiche rotture che ampliano le emissioni in condizioni di "OFF-state" fino alla fine del test. Si è pensato, quindi, di analizzare il comportamento di altri dispositivi TLM05 con uno stress a corrente costante, mantenendo

fissata la corrente che provoca il danno iniziale e raddoppiando mano a mano il periodo di stress, fino ad una durata complessiva di 10 ore.

Sui dispositivi TLM05–X4 e TLM05–X6, dopo circa mezzora, si sono verificati i primi danni che rimangono o si amplificano fino al termine del test. Durante lo stress, gli andamenti delle emissioni seguono quelli della tensione V_{GS} nel tempo.

Con lo stress a corrente costante, su altri dispositivi TLM05 (in particolare i TLM05–X7 e TLM05–X8), non si sono verificati segni evidenti di degrado, anche portando la corrente a livelli più elevati (fino a $-8 \mu A$) e quindi superando ampiamente il livello critico di tensione inversa. Si è pensato, pertanto, di analizzare il comportamento di questi ultimi dispositivi TLM05 mantenendo costante la corrente per un tempo pari a 8 ore (tempo molto maggiore rispetto ad un singolo periodo di stress). Dagli andamenti della tensione V_{GS} nel tempo, si nota un periodo iniziale di tipo transitorio (dell'ordine di un migliaio di secondi) seguito da un comportamento più stabile e lievemente crescente nel tempo. Questo comportamento potrebbe essere dovuto, per la prima parte (di tipo transitorio), ad un intrappolamento di carica molto lento, mentre per la seconda parte (lievemente crescente nel tempo), ad un progressivo e graduale invecchiamento, una volta neutralizzati gli stati trappola.

Infine, nel corso dello stress, si può estrapolare una diretta correlazione tra la tensione di gate e l'elettroluminescenza del dispositivo. Ciò può essere dovuto agli elevati campi elettrici che, eccitando gli elettroni di canale, favoriscono la generazione di fotoni emessi dai dispositivi.

Comunque ulteriori misure affidabilistiche sono necessarie per una migliore comprensione del fenomeno.

Elenco delle figure

1.1	Struttura reticolare	10
1.2	Struttura a bande	10
1.3	Velocità di deriva in funzione del campo elettrico [2]	13
1.4	Mobilità in funzione della temperatura [3].....	15
1.5	Velocità di deriva in funzione del campo elettrico per diverse temperature [3]	18
1.6	Confronto tra celle elementari di zaffiro e GaN	14
1.7	Schema di un reattore MBE.....	10
1.8	Reattore (a) e principio di funzionamento (b) per la TF-MOCVD	13
1.9	Caratteristica I-V della giunzione tra GaN e alcuni metalli usati per contattarlo.....	15
2.1	Struttura cristallina del GaN nelle polarità Ga e N.....	22
2.2	(a) Struttura del dispositivo; (b) Diagramma a bande; (c) Densità di carica.....	23
2.3	Diagramma a bande di un'eterostruttura AlGa _N /Ga _N	23
2.4	Modello dei donori superficiali con spessore di AlGa _N intrinseco minore (a) e maggiore (b) dello spessore critico di barriera; (c) Densità calcolata nel 2DEG in funzione dello spessore di barriera [11]	24
2.5	Struttura base di un HEMT.....	15
2.6	Origine delle trappole nei dispositivi AlGa _N /Ga _N a livello fisico e a livello di diagramma a bande	26
2.7	Caratteristica DC per un AlGa _N /Ga _N HEMT. Le linee tratteggiate si riferiscono ad una misura con V_{DS} massima pari a 10V, mentre le linee continue, si riferiscono ad una misura con V_{DS} fino a 20V [13].....	27
2.8	Fenomeno della dispersione in frequenza	28
2.9	Effetto dei fotoni con energia superiore all'energy gap del Ga _N sul gate virtuale ..	29
2.10	Passivazione di un AlGa _N /Ga _N HEMT	30
2.11	Caratteristica DC della corrente di drain prima, linee continue, e dopo, linee tratteggiate, la passivazione con Si ₃ N ₄ [13]	31

2.12	HEMT con field plate (a) e con struttura a gate recess (b) [17].....	31
2.13	Sezione trasversale di un AlGaIn/GaN HEMT, nella quale si evidenziano le zone critiche che possono essere soggette a degrado.....	32
2.14	Fotoni/ I_D in funzione di $1/(V_{DS}-V_{DSAT})$	34
2.15	Fotoni in funzione di V_{GS} per diversi valori di V_{DS}	15
2.16	Immagini di elettroluminescenza (intensità in falsi colori) di un dispositivo HEMT polarizzato a $V_G = -35$ V, $V_D = V_S = 0$ V, tempo di emissione pari a 120 secondi	36
3.1	Dispositivo TLM (a) e dispositivo HEMT (b) con configurazione RF	38
3.2	Cella PCM.....	39
3.3	Cella standard con i diversi dispositivi e relativo numero di gate-finger	39
3.4	Probe station Karl Suss	40
3.5	Andamento nel tempo della tensione V_{DD} e della corrente I_D	42
3.6	Sistema di misura double-pulse: R_M è una resistenza di adattamento	43
3.7	Microscopio ad emissione Phemos P200.....	44
4.1	Misure DC su SELEX-35 X - 5A ($W_G = 200$ μ m, $L_G = 0.5$ μ m).....	47
4.2	Misure DC su SELEX-35 Y - 4C ($W_G = 200$ μ m, $L_G = 0.5$ μ m).....	48
4.3	Misure Double Pulse su SELEX-35 Y - 2A ($W_G = 200$ μ m, $L_G = 0.5$ μ m).....	50
4.4	Misure Double Pulse su SELEX-35 Y - 5A ($W_G = 200$ μ m, $L_G = 0.5$ μ m).....	51
4.5	Misure Double Pulse su SELEX-35 Y - 3C ($W_G = 200$ μ m, $L_G = 0.5$ μ m)	51
5.1	Misure DC su SELEX-35 Y - 6A prima e dopo lo <i>step stress</i> in tensione	54
5.2	Misure DC su SELEX-35 Y - 6A prima e dopo lo <i>step stress</i> in tensione	55
5.3	Variazioni parametri DC su SELEX-35 Y - 6A durante lo <i>step stress</i> in tensione.	56
5.4	Variazioni parametri DC su SELEX-35 Y - 6A durante lo <i>step stress</i> in tensione.	57
5.5	Emissioni in “ON state” su Y - 6A nel corso dello <i>step stress</i> in tensione	58
5.6	Emissioni in “OFF state” su Y - 6A nel corso dello <i>step stress</i> in tensione	59
5.7	Emissioni durante lo stress su Y - 6A	60
5.8	Misure DC su SELEX-35 X5 - A prima e dopo lo <i>step stress</i> in corrente.....	62
5.9	Misure DC su SELEX-35 X5 - A prima e dopo lo <i>step stress</i> in corrente.....	63
5.10	Variazioni parametri DC su SLX-35 X5 - A durante lo <i>step stress</i> in corrente.....	64
5.11	Variazioni parametri DC su SLX-35 X5 - A durante lo <i>step stress</i> in corrente.....	65
5.12	Emissioni in “ON state” su X5 - A nel corso dello <i>step stress</i> in corrente	66
5.13	Emissioni in “OFF state” su X5 - A nel corso dello <i>step stress</i> in corrente.....	66
5.14	Emissioni durante lo stress su X5 - A	67
5.15	Misure DC su TLM05 X4 prima e dopo lo <i>step stress</i> in corrente.....	69

5.16	Misure DC su TLM05 X4 prima e dopo lo <i>step stress</i> in corrente	70
5.17	Variazioni parametri DC su TLM05 X4 durante lo <i>step stress</i> in corrente.....	71
5.18	Variazioni parametri DC su TLM05 X4 durante lo <i>step stress</i> in corrente.....	72
5.19	Transitorio della V_{GS} su TLM05 X4 durante lo stress in corrente (prima parte)	73
5.20	Transitorio della V_{GS} su TLM05 X4 durante stress in corrente (seconda parte).....	73
5.21	Emissioni in “ON state” su TLM05 X4 nel corso dello <i>step stress</i> in corrente	74
5.22	Emissioni in “OFF state” su TLM05 X4 nel corso dello <i>step stress</i> in corrente.....	75
5.23	Emissioni durante lo stress su TLM05 X4	76
5.24	Misure DC su TLM05 X6 prima e dopo lo <i>step stress</i> in corrente	77
5.25	Misure DC su TLM05 X6 prima e dopo lo <i>step stress</i> in corrente	78
5.26	Variazioni parametri DC su TLM05 X6 durante lo <i>step stress</i> in corrente.....	79
5.27	Variazioni parametri DC su TLM05 X6 durante lo <i>step stress</i> in corrente.....	80
5.28	Transitorio della V_{GS} su TLM05 X6 durante lo stress in corrente (prima parte)	81
5.29	Transitorio della V_{GS} su TLM05 X6 durante stress in corrente (seconda parte).....	81
5.30	Emissioni in “ON state” su TLM05 X6 nel corso dello <i>step stress</i> in corrente	82
5.31	Emissioni in “OFF state” su TLM05 X6 nel corso dello <i>step stress</i> in corrente.....	83
5.32	Emissioni durante lo stress su TLM05 X6	84
5.33	Misure DC su TLM05 X8 prima e dopo lo <i>step stress</i> in corrente	85
5.34	Misure DC su TLM05 X8 prima e dopo lo <i>step stress</i> in corrente	86
5.35	Variazioni parametri DC su TLM05 X8 durante lo <i>step stress</i> in corrente.....	87
5.36	Variazioni parametri DC su TLM05 X8 durante lo <i>step stress</i> in corrente.....	88
5.37	Transitorio della V_{GS} su TLM05 X8 durante lo stress in corrente (prima parte)	89
5.38	Transitorio della V_{GS} su TLM05 X8 durante stress in corrente (seconda parte).....	89
5.39	Emissioni in “ON state” su TLM05 X8 nel corso dello <i>step stress</i> in corrente	90
5.40	Emissioni in “OFF state” su TLM05 X8 nel corso dello <i>step stress</i> in corrente.....	91
5.41	Emissioni durante lo stress su TLM05 X8	91
5.42	Misure DC su TLM05 X8 prima e dopo lo <i>step stress</i> in corrente	92
5.43	Misure DC su TLM05 X8 prima e dopo lo <i>step stress</i> in corrente	93
5.44	Variazioni parametri DC su TLM05 X8 durante lo <i>step stress</i> in corrente.....	94
5.45	Variazioni parametri DC su TLM05 X8 durante lo <i>step stress</i> in corrente.....	95
5.46	Transitorio della V_{GS} su TLM05 X8 durante lo stress in corrente (prima parte)	96
5.47	Transitorio della V_{GS} su TLM05 X8 durante stress in corrente (seconda parte).....	96
5.48	Emissioni in “ON state” su TLM05 X8 nel corso dello <i>step stress</i> in corrente	97
5.49	Emissioni in “OFF state” su TLM05 X8 nel corso dello <i>step stress</i> in corrente.....	98
5.50	Emissioni durante lo stress su TLM05 X8	98

5.51	Transitori della V_{GS} su TLM05 X8 durante i differenti step stress in corrente	99
5.52	Misure DC su TLM05 X7 prima e dopo lo stress in corrente.....	100
5.53	Misure DC su TLM05 X7 prima e dopo lo stress in corrente.....	101
5.54	Transitorio della V_{GS} in relazione con l'elettroluminescenza su TLM05 X7 durante lo stress in corrente	102
5.55	Transitorio della V_{GS} media in relazione con l'elettroluminescenza su TLM05 X7 durante stress in corrente	102
5.56	Relazione tra l'elettroluminescenza e tensione media V_{GS} su TLM05 X7 (per V_{GS} da 0 a 1200 secondi).....	103
5.57	Relazione tra l'elettroluminescenza e tensione media V_{GS} su TLM05 X7 (per V_{GS} da 1200 a 28800 secondi).....	103

Elenco delle tabelle

1.1	Proprietà elettriche di alcuni semiconduttori [1]	10
1.2	Caratteristiche di zaffiro e carburo di silicio [6]	10
3.1	Caratteristiche del wafer Selex 35	38
3.2	Caratteristiche geometriche dei TLM.....	40
4.1	Parametri caratteristici di HEMT con 2 gate-finger ($W_G = 200 \text{ um}$, $L_G = 0.5 \text{ um}$)...	46

Bibliografia

- [1] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y.-F. Wu, “AlGaIn/GaN HEMTs - An overview of device operation and application,” *Proceeding of the IEEE*, vol. 90, no. 6, 2002.
- [2] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul, and F. Ren, “GaN: Processing, defects and devices”, *Journal of Applied Physics*, vol. 86, no. 1, 1999.
- [3] U. V. Bhapkar and M. S. Shur, “Monte Carlo calculation of velocity-field characteristics of wurtzite gan”, *Journal of Applied Physics*, vol. 82, no. 4, 1997.
- [4] S. C. Jain and et al, “III-nitrides: growth, characterization and properties”, *Journal of Applied Physics*, vol. 62, 2000.
- [5] M. E. Lin. and et al, “GaN grown on hydrogen plasma cleaned 6H-SiC Substrates”, *Journal of Applied Physics*, vol. 87, 1993.
- [6] T. Miyajima, M. Ozawa, T. Asatsuma, H. Kawai, and M. Ikeda, “Minority carrier diffusion length in GaN and ZnSe”, *Journal of crystal growth* 189/190 (1998)786-772(1998).
- [7] J. H. Edgar, S. Strite, I. Akasaki, H. Amano, and C. Wetzel, *Properties, processing and application of gallium nitride and related semiconductors. INSPEC publication, emis Datareviews series*, 23.
- [8] R. S. Muller and T. I. Kamins, *Device Electronics for Integrated Circuits*. John Wiley and Sons, 2003.
- [9] J.A.Bardwell, Y. Liu, S.Rauhala, P.Bouwuis, P.Marshall, H.Tang, and J.B.Webb, “Effect of Various Pre-Treatments on Ti/Al/Ti/Au Ohmic Contacts for AlGaIn/GaN HFET Devices”, *Phys. stat. sol. (a)* 188, no. 1, 2001.
- [10] J. S. Jang, S. J. Park, and T. J. Seong, “Effects of surface treatment on the electrical properties of ohmic contacts to (In)GaN for high performance optical devices”, *Phys. Stat. Sol. (a)* 194, no. 2, 2002.

- [11] J. Ibbetson, P. Fini, K. Ness, J. S. S. DenBaars, and U. Mishra, "Polarization effects, surface states and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors", *Applied Physics Letters*, vol. 77, no. 2, pp. 250_252, 2000.
- [12] S. Binari, P. Klein, and T. Kazior, "Trapping effects in GaN and SiC microwave FETs", *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 6, pp. 1048_1058, 2002.
- [13] S. Binari, K. Ikossi, J. Roussos, W. Kruppa, D. Park, H. Dietrich, D. Koleske, A. Wickenden, and R. Henry, "Trapping effects and microwave power performance in AlGaIn/GaN HEMTs", *IEEE Transaction on Electron Devices*, vol. 48, no. 3, 2001.
- [14] M. Khan, M. Shur, Q. Chen, and J. Kuznia, "Current/voltage characteristic collapse in AlGaIn/GaN heterostructure insulated gate field effect transistors at high drain bias", *Electronics Letters*, vol. 30, no. 25, 1994.
- [15] R. Vetury, N. Zhang, S. Keller, and U. Mishra, "The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HFETs", *IEEE Transaction on Electron Devices*, vol. 48, no. 3, 2001.
- [16] C. Nguyen, N. Nguyen, and D. Grider, "Drain current compression in GaN MODFETs under large-signal modulation at microwave frequencies", *Electronics Letters*, vol. 35, no. 16, 1999.
- [17] Umesh K. Mishra, Likun Shen, Thomas E. Kazior, and Yi-Feng Wu, "GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers", *Proceedings of IEEE*, Vol. 96, No. 2, February 2008.
- [18] C. Canali, F. Castaldo, F. Fantini, D. Ogliari, L. Umena, and E. Zanoni, "Gate metallization 'Sinking' into the active channel in Ti/W/Au metallized power MESFETs," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 7, no. 3, pp. 185–187, Mar. 1986.
- [19] R. Coffie, Y. Chen, I. P. Smorchkova, M. Wojtowicz, Y. C. Chou, B. Heying, and A. Oki, "Impact of AlN interlayer on reliability of AlGaIn/GaN HEMTs," in *Proc. IEEE Int. Rel. Phys. Symp.*, 2006, pp. 99–102.
- [20] G. Meneghesso, A. Mion, Y. Haddab, M. Pavesi, M. Manfredi, C. Canali, and E. Zanoni, *Journal of Applied Physics*, vol. 82, no. 5547, 1997.
- [21] C. Canali, A. Paccagnella, P. Pisoni, C. Tedesco, P. Telaroli, and E. Zanoni, "Impact ionization phenomena in AlGaAs/GaAs HEMTs", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 38, no. 11, 1991.
- [22] T. Nakao, Y. Ohno, M. Akita, S. Kishimoto, K. Maezawa, and T. Mizutani, "Electroluminescence in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors under high bias voltage", *Jpn. J. Appl. Phys.1, Regul. Rap. Short Notes*, vol. 41, no. 4A, 2002.

- [23] N. Shigekawa, K. Shiojima, and T. Suemitsu, "Electroluminescence characterization of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 8, 2001.
- [24] N. Shigekawa, K. Shiojima, and T. Suemitsu, "Optical Study of high-biased AlGa_{Ni}GaN high-electron-mobility-transistors", *Journal of Applied Physics*, vol. 92, no. 1, pp. 531_535, 2002.
- [25] J. Joh and J. A. del Alamo, "Mechanisms for electrical degradation of Ga_N high electron mobility transistors", *IEDM Tech. Dig.*, pp. 415_418, 2006.
- [26] C. Lee, L. Witkowski, H.-Q. Tserng, P. Saunier, R. Birkhahn, D. Olson, G. Munns, S. Guo, and B. Albert, "Effects of AlGa_N/Ga_N HEMT structure on rf reliability", *Electronics Letters*, vol. 41, no. 3, 2005.
- [27] P. Valizadeh and D. Pavlidis, "Investigation of the impact of Al mole-fraction on the consequences of rf stress on Al_xGa_{1-x}N/Ga_N MODFETs", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 52, no. 9, 2005.
- [28] Y. C. Chou, D. Leung, I. Smorchkova, M. Wojtowicz, R. Grundbacher, L. Callejo, Q. Kan, R. Lai, P. H. Liu, D. Eng, and A. Oki, "Degradation of AlGa_N/Ga_N HEMTs under elevated temperature lifetesting", *Microelectron. Reliab.*, vol. 44, no. 7, 2004.
- [29] F. Medjdoub, J. F. Carlin, M. Gonschorek, E. Feltin, M. A. Py, D. Ducatteau, C. Gaquière, N. Grandjean, and E. Kohn, "Can InAlN/Ga_N be an alternative to high power/high temperature AlGa_N/Ga_N devices", *IEDM Tech. Dig.*, 2006.
- [30] E. Zanoni, F. Danesin, M. Meneghini, A. Cetronio, C. Lanzieri, M. Peroni, and G. Meneghesso, "Localized damage in AlGa_N/Ga_N HEMTs induced by reverse-bias testing", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 30, no. 5, 2009.

Ringraziamenti

- Mamma e papà per l'affetto, gli insegnamenti veri ed aver sopportato fino ad ora il mio carattere;
- Francesco, ottimo fratello e punto di riferimento, saggio dispensatore di consigli (utili e non) ed inesauribile sostegno morale;
- Kekko per essere sempre il mio migliore amico e compagno di avventure;
- Giulia per l'amicizia e perché si è dimostrata sempre disponibile ad aiutarmi e spronarmi anche nei momenti difficili;
- Martino per l'amicizia, per avermi fatto crescere ed avere stimolato il mio intelletto;
- Gli amici fedeli: Silvano (detto Spazzolino), Marco e Luca Pregnolato, Tix, Ivano Z., Ivano C., Corrado, Cesare, Roberto (Raffaelli), Lele, Ariano (detto Gabry o Fasano), Fisico, Diego, Ace, Riccardo, Baffo, Punk, Pippo, Baschi, Antonio, Monta, Manuel (detto Grosso), Stefio, Ciosa, Mogno e tutti gli amici del vecchio collegio "B.C.G.";
- Elisa e Alessandro per la gentile ospitalità in "Casa Giacomini";
- Gemma per l'amicizia e l'immancabile supporto morale;
- Ketto, Kekko, i gemelli (Mattia e Marco), Ivano Z., Andrea Vian, Ariano e Gian, amici di disavventure, risse e serate sempre varie e divertenti;
- Gli amici del laboratorio: Alberto, Marco (detto Dog), Vincenzo, Fabiana, Luca, Antonio e Nicolò per l'immensa pazienza che hanno dimostrato nei miei confronti;
- I professori Meneghesso e Zanoni che mi hanno offerto la possibilità di fare la tesi col gruppo di micro.

... ed infine giunsi al termine del mio lungo e tortuoso cammino di formazione!