



## MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITA' E DELLA RICERCA

### Programmi di ricerca cofinanziati - Modello E Relazione scientifica conclusiva sui risultati di ricerca ottenuti - ANNO 2007 prot. 2007MNJWH2

<b>1. Area Scientifico Disciplinare principale</b>	<i>09: Ingegneria industriale e dell'informazione</i>
<b>2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca</b>	<i>GHIONE Giovanni</i>
- <b>Università</b>	<i>Politecnico di TORINO</i>
- <b>Facoltà</b>	<i>Facoltà di INGEGNERIA II</i>
- <b>Dipartimento/Istituto</b>	<i>Dip. ELETTRONICA</i>
<b>3. Titolo del programma di ricerca</b>	<i>Circuiti integrati a larga banda per microonde e onde millimetriche su nitruro di gallio per sottosistemi a basso rumore ed alta potenza</i>
<b>4. Settore principale del Programma di Ricerca:</b>	<i>ING-INF/01</i>
<b>5. Costo originale del Programma:</b>	<i>430.000 €</i>
<b>6. Quota Cofinanziamento MIUR:</b>	<i>165.000 €</i>
<b>7. Quota Cofinanziamento Ateneo:</b>	<i>70.752 €</i>
<b>8. Finanziamento totale:</b>	<i>235.752 €</i>
<b>9. Durata:</b>	<i>24 mesi</i>

## 10. Obiettivo della ricerca eseguita

*Il progetto di ricerca Circuiti integrati a larga banda per microonde e onde millimetriche su nitruro di gallio per sottosistemi a basso rumore ed alta potenza ha mirato a conseguire un avanzamento sullo stato dell'arte nel settore dei dispositivi di potenza per le microonde su AlGaIn/GaN, utilizzando come partner tecnologico italiano esterno la foundry SELEX-SI. SELEX-SI ha collaborato dall'esterno alla ricerca fornendo dispositivi e circuiti di test, e ha ricevuto, attraverso una interazione continua, informazioni sul miglioramento della tecnologia, le prestazioni RF, l'affidabilità e il progetto di circuiti integrati.*

*Benché infatti i progressi nella tecnologia del GaN abbiano condotto a spettacolari prestazioni di potenza a RF, sviluppi di grande interesse sono ancora possibili nei circuiti e dispositivi integrati su GaN per microonde, ove il GaN offre prestazioni ineguagliate da altri semiconduttori composti per densità di potenza e robustezza, ed apre la strada alla realizzazione di moduli TX/RX robusti e compatti per applicazioni terrestri e spaziali. Gli obiettivi principali del progetto sono:*

*Sviluppo e ottimizzazione della tecnologia degli HEMT in GaN per transceiver a microonde e onde millimetriche, mediante perfezionamenti del processo tecnologico disponibile presso SELEX-SI, riscaldamento del gate e altri miglioramenti della geometria e dei materiali; sviluppo di una libreria affidabile di elementi passivi. Analisi di affidabilità di HEMT in GaN e di componenti passivi su GaN per circuiti integrati alle microonde che permetta non soltanto di valutare i processi disponibili, ma anche di comprendere meglio molti punti scientificamente controversi che riguardano i meccanismi di guasto dei dispositivi in GaN. Caratterizzazione sperimentale e modellazione circuitale di elementi attivi e passivi in GaN per circuiti integrati di potenza e a basso rumore. Progetto di circuiti transceiver dimostratori (amplificatore di potenza e amplificatore a basso rumore) con prestazioni significative rispetto allo stato dell'arte.*

*Il progetto ha coinvolto quattro unità di ricerca (UR), UR-PT (Politecnico di Torino), UR-TV (Un. di Roma Tor Vergata), UR-PD (Un. di Padova), UR-MO (Un. di Modena e Reggio Emilia) che hanno confermato una tradizione di fattiva cooperazione, e si è svolto complessivamente secondo le linee di ricerca e i workpackages inizialmente delineati, con il coinvolgimento di una o più unità di ricerca, secondo lo schema:*

### **SIMULAZIONE (SI)**

*SI-WP.1 Simulazione fisica e termica di HEMT su GaN (Mesi 1-24) (UR-PT, UR-MO)*

### **AFFIDABILITÀ (RE)**

*RE-WP.1 Affidabilità di dispositivi passivi (Mesi 1-12) (UR-PD)*

*RE-WP.2 Affidabilità e identificazione dei meccanismi di guasto (Mesi 1-24) (UR-PD, UR-MO)*

### **CARATTERIZZAZIONE E MODELLI RF (CM)**

*CM-WP.1 Caratterizzazione e modelli di elementi passivi (Mesi 1-12) (UR-PT, UR-TV)*

CM-WP.2 Caratterizzazione di elementi attivi con misure DC, DC impulsate e di piccolo segnale (Mesi 1-12,1-18) (UR-PD, UR-TV, UR-MO)

CM-WP.3 Caratterizzazione di potenza e modelli di ampio segnale di elementi attivi (Mesi 13-24) (UR-PT, UR-TV, UR-MO)

CM-WP.4 Caratterizzazione e modelli di rumore di elementi attivi (Mesi 13-24) (UR-TV)

## PROGETTO DI DIMOSTRATORI (DD)

DD-WP.1 Progetto di dimostratori LNA (Mesi 13-24) (UR-TV)

DD-WP.2 Progetto di dimostratori di potenza (Mesi 13-24) (UR-PT)

In contributi previsti delle quattro unità coinvolte sono stati:

UR-PT Modello elettrotermico autoconsistente, caratterizzazione e progetto di circuiti integrati HEMT su GaN per microonde e onde millimetriche.

UR-TV Caratterizzazione, modellistica e progetto per circuiti integrati a microonde e onde millimetriche a basso rumore in GaN.

UR-PD Caratterizzazione e affidabilità di dispositivi su nitruro di gallio per circuiti integrati a basso rumore e alta potenza per microonde e onde millimetriche.

UR-MO Affidabilità a radiofrequenza e simulazioni numeriche di dispositivi GaN HEMT avanzati e standard per applicazioni di potenza a microonde e ad onde millimetriche.

## 11. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

### LINEA DI RICERCA SIMULAZIONE (SI)

Nell'ambito della linea UR-PT ha simulato con tecniche Monte Carlo i parametri di trasporto del GaN e leghe poi utilizzati da UR-MO nello studio di dispositivi HEMT su GaN scalati, che UR-PT ha valutato dal punto di vista termico; UR-PT ha quindi sviluppato modelli termici comportamentali orientati al circuito, utilizzati poi nel modello si ampio segnale per il progetto del dimostratore.

SI-WP.1 Simulazione fisica e termica di HEMT su GaN (Mesi 1-24) (UR-PT, UR-MO)

Nel primo anno UR-PT ha studiato il trasporto nel GaN con un simulatore ensemble Monte Carlo in cui sono anche descritte le interazioni nonpolari tra portatori e fononi nel quadro dell'approssimazione rigid pseudoion e il tunneling interbanda. Il modello si confronta bene con le caratteristiche velocità campo degli elettroni (Fig. 11). L'analisi ha permesso di determinare approssimazioni analitiche per tutti i parametri di trasporto richiesti dal codice di simulazione usato da UR-MO (DESSIS-ISE, cfr. Fig. 12).

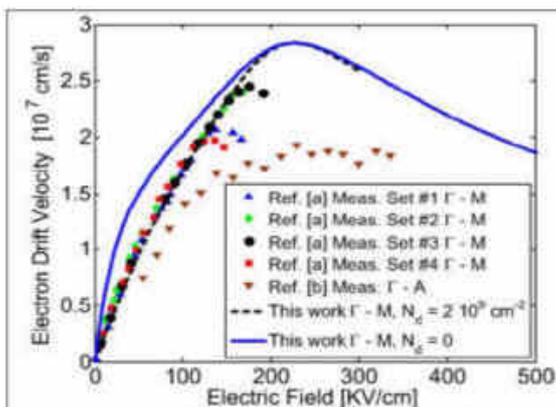


Fig. 1: Confronto tra misure e simulazione Monte Carlo (UR-PT) della velocità di trascinamento degli elettroni nel GaN a temperatura ambiente. [Ref. [a]: Barker et al., Physica B 314, 39, 2002], Ref. [b]: Wraback et al., Appl. Phys. Lett. 76, 1155, 2000)

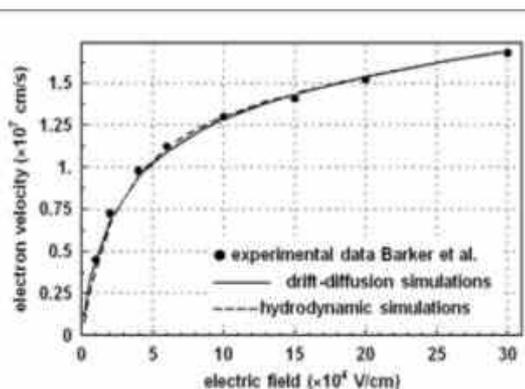
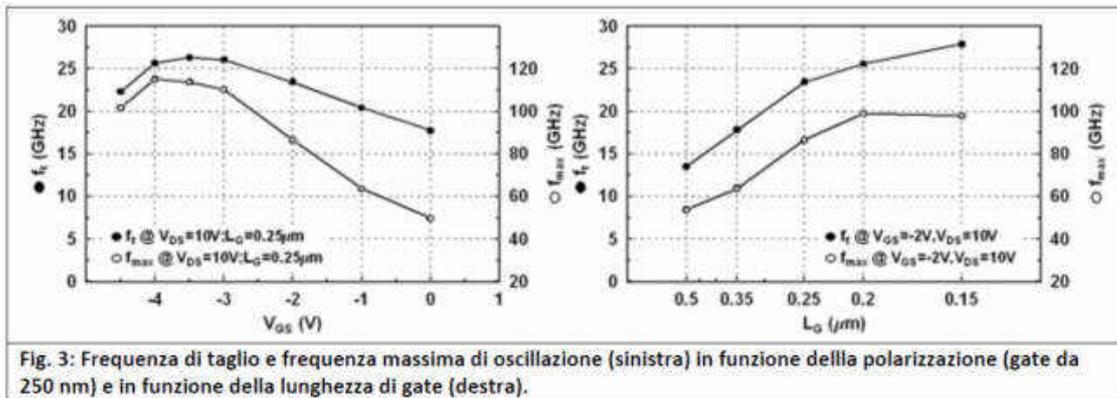
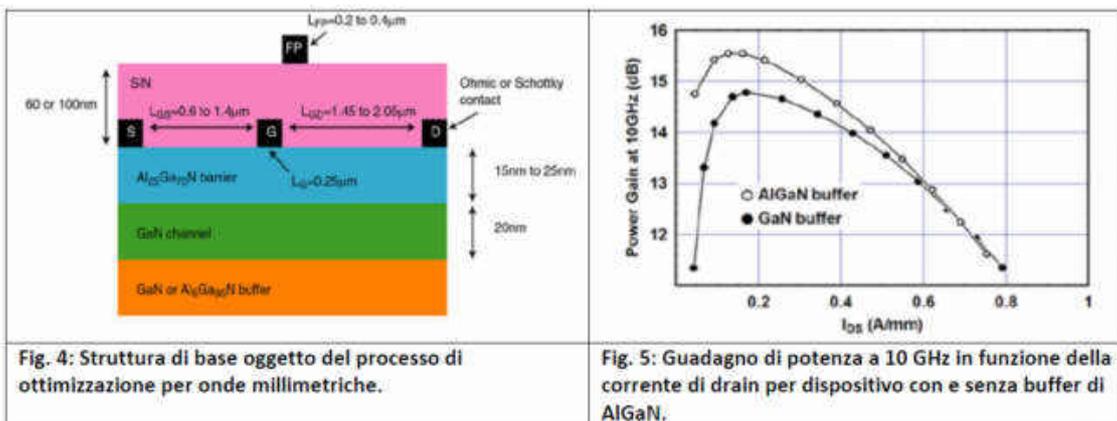


Fig. 2: Curva velocità campo di eterogiunzione AlGaIn/GaN in funzione del campo elettrico (UR-MO): confronto fra i dati in Barker et al. e le simulazioni EB e idrodinamiche.



UR-MO ha quindi condotto nel primo anno una analisi di riscaldamento mediante modelli fisici, che evidenzia un miglioramento delle prestazioni stimate al ridursi della lunghezza di gate, cfr. Fig. 3, che tende però a saturare a causa di effetti parassiti quali resistenze di accesso e conduttanza di uscita. Nel secondo anno UR-MO ha valutato l'applicabilità agli HEMT in GaN di alcune strutture avanzate per microonde e onde millimetriche, attraverso uno studio di ottimizzazione che parte dalla struttura con field plate di Fig. 4. In particolare sono stati valutati i punti seguenti: (1) effetto della riduzione dello spessore di barriera da 25nm a 15nm; (2) riduzione della distanza gate-source da 1.4 a 0.6μm; (3) riduzione della distanza gate-drain da 2.05 a 1.45μm; (4) utilizzo di un contatto Schottky di drain; (5) introduzione del contatto di field-plate; (6) utilizzo di una struttura a doppia eterogiunzione con buffer in AlGaIn con concentrazione di Al pari al 5%. Un'analisi dettagliata è riportata nella relazione i UR-MO; in sintesi si può dire che (1) (2) portano ad un aumento del guadagno dell'ordine di 1 dB, (3) è irrilevante, (4) non porta miglioramenti, (5) aumenta la potenza ma diminuisce il guadagno. Per quanto riguarda (6) si ottengono miglioramenti interessanti della prestazione di guadagno, cfr. Fig. 5.



Concludendo possiamo riassumere i risultati ottenuti dall'ottimizzazione della struttura dell'HEMT in nitruro di gallio con le seguenti considerazioni: ridurre esclusivamente la lunghezza del contatto di gate può non essere sempre efficace nell'aumentare le prestazioni in frequenza; ridurre lo spessore della barriera in AlGaIn e la distanza fra i contatti di gate e source possono aumentare significativamente le prestazioni del dispositivo; l'utilizzo di un epitassia a doppia eterostruttura può significativamente incrementare il guadagno di potenza RF.

UR-PT ha affrontato parallelamente il tema del progetto termico di dispositivi a gate submicrometrico. Il riscaldamento richiede dispositivi con periferia di gate ridotta ma anche con piccole lunghezze di gate, fattori che giocano in modo opposto sulla resistenza termica (a favore e contro rispettivamente). Per ottenere previsioni quantitative è necessario ricorrere a simulazioni FEM che sono state condotte partendo da un dispositivo HEMT SELEX da 250 nm (Fig. 6) e utilizzando i modelli di conducibilità indicati. Si è considerato sia un heatsink ideale sia un heatsink in CuW. I risultati predicono un aumento della temperatura di canale (a parità di potenza dissipata) al diminuire della lunghezza di gate, indipendentemente dallo spessore del substrato e dalla scelta del montaggio (Fig. 7). Fig. 8 mostra la resistenza termica di un dispositivo rilevante ai fini del progetto per vari modelli di conducibilità e per pozzo di calore ideale o di CuW.

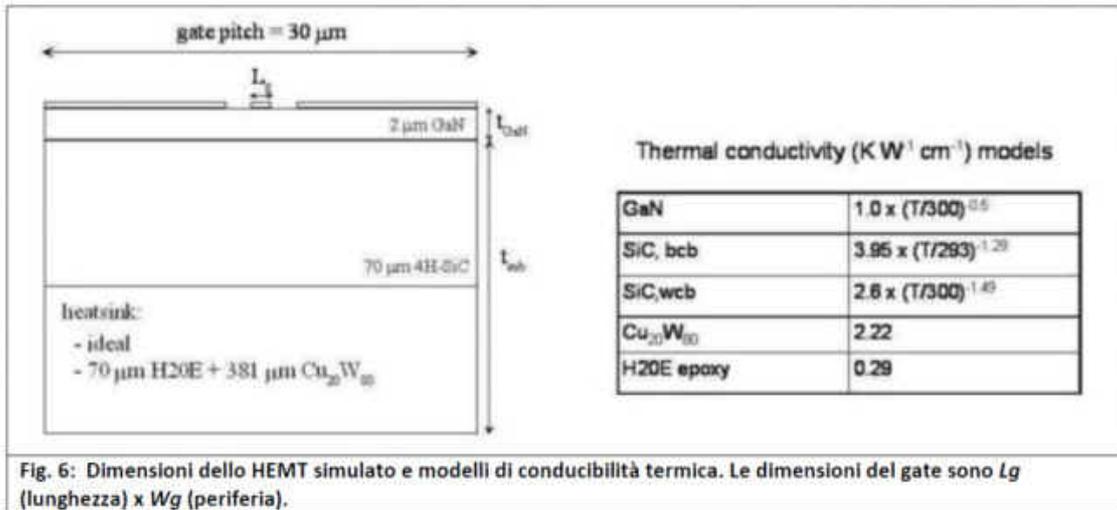


Fig. 6: Dimensioni dello HEMT simulato e modelli di conducibilità termica. Le dimensioni del gate sono  $L_g$  (lunghezza) x  $W_g$  (periferia).

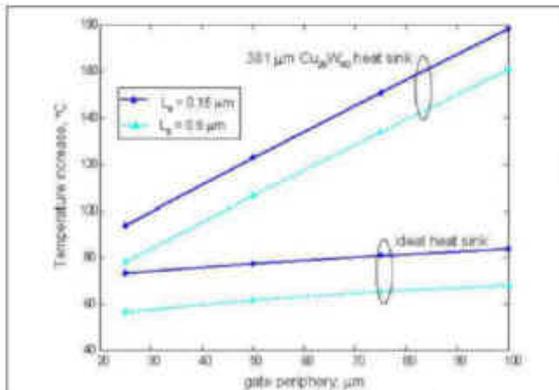


Fig. 7: Aumento della temperatura rispetto allo heat sink in funzione della periferia di gate per HEMT da 0.15 micron e da 0.5 micron. Conducibilità 4H-SiC bcb e potenza dissipata di 1 W/mm.

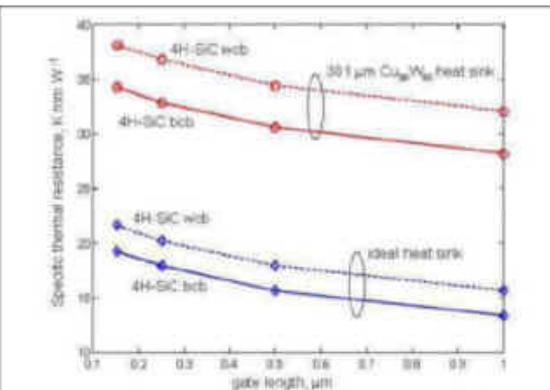


Fig. 8: Resistenza termica specifica in funzione della lunghezza di gate per HEMT con periferia di gate di 75 micron. La potenza dissipata è 1 W/mm.

Nel secondo UR-PT continuato lo sviluppo del modello comportamentale Wiener per mettere a punto il modello elettrotermico utilizzato nel progetto del dimostratore e nella valutazione del suo comportamento termico (cfr. DD-WP.2). Il dispositivo selezionato ha 4 dita di gate 75  $\mu m$  e lunghezza 0.25  $\mu m$ , distanza tra i gate di 30  $\mu m$ . La struttura trasversale comprende uno strato epitassiale di 2  $\mu m$  di GaN, substrato di 4H-SiC di spessore 70  $\mu m$ , metallizzazioni in Au di 1.2  $\mu m$ . Per quanto riguarda il montaggio, si e' assunto che il chip venga incollato su un carrier metallico convenzionale di Cu<sub>20</sub>W<sub>80</sub> (spessore 381  $\mu m$ ) tramite una colla epossidica a base di argento (Diemat DM6030hk) il cui spessore e' stimato intorno ai 25  $\mu m$ . La risultante geometria 3D e relativa discretizzazione agli elementi finiti sono mostrate in Fig. 9. Fig. 9 (destra) mostra un esempio di profilo di temperatura. La resistenza termica predetta nei diversi casi e' riportata in Fig. 10 (sinistra). Supponendo per ciascun attivo una potenza di alimentazione di 2 W ed una efficienza RF stimata intorno al 20 %, la potenza totale dissipata risulta 1.6 W, corrispondente ad una temperatura media sul dito di 115 C (modello bcb) - 128 C (modello wcb) per il montaggio su carrier CuW.

La stima della resistenza termica in Fig. 10 e' stata infine corredata da una simulazione in regime transitorio per l'estrazione del modello comportamentale Wiener, realizzato come la cascata di una funzione non lineare (resistenza termica vs. potenza dissipata stimata dalle simulazioni in DC) ed un filtro lineare estratto dalla risposta ad un gradino di potenza dissipata di piccola ampiezza (nel caso specifico 100 mW). La risposta al gradino ottenuta dalla simulazione FEM e' stata poi sintetizzata tramite un filtro passivo di ordine 9. Come mostrato in Fig. 10 (destra), il modello di Wiener riproduce con grande accuratezza il comportamento dinamico del dispositivo anche a potenze elevate, con un errore massimo sulla temperatura stimata inferiore al 3 % (10 % in termini di innalzamento della temperatura rispetto alla temperatura ambiente). Il modello Wiener e' stato quindi utilizzato per la messa a punto del modello circuitale elettrotermico.

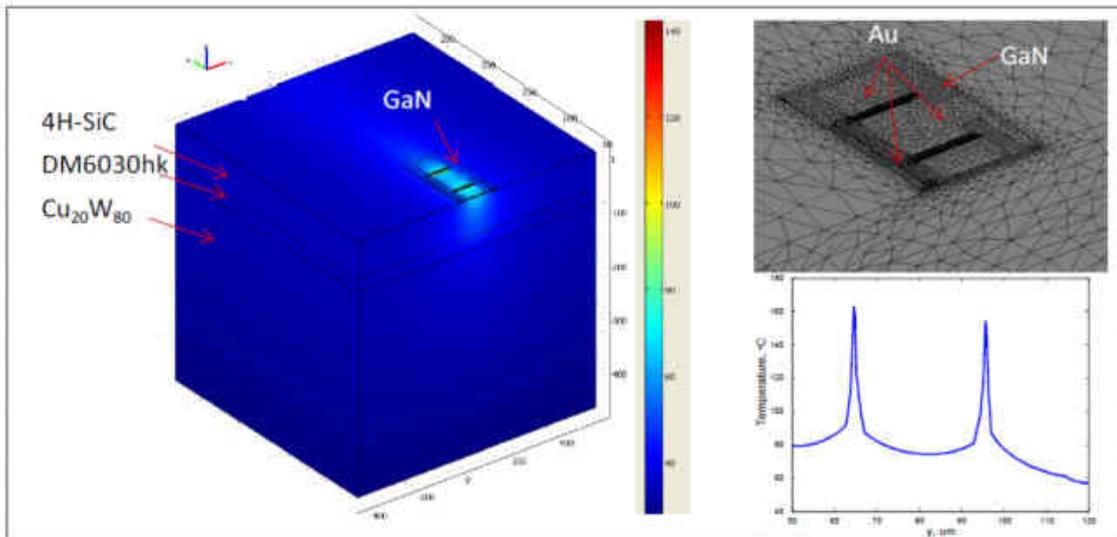


Fig. 9: Layout di FET 4 x 75 um (mostrata metà, sinistra). A destra: dettagli della discretizzazione della mesh e profilo di temperatura attraverso le dita; la potenza dissipata è 2 W e la temperatura massima circa 162 C (modello SiC wcb).

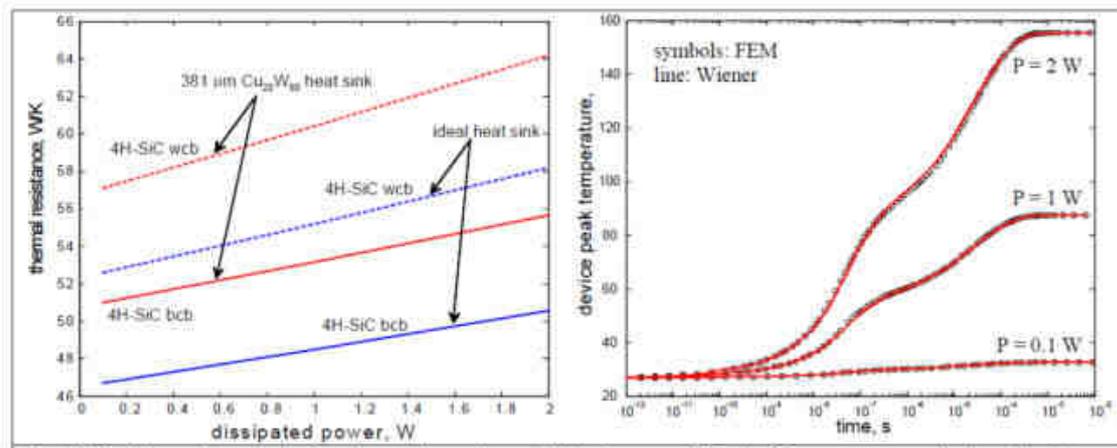


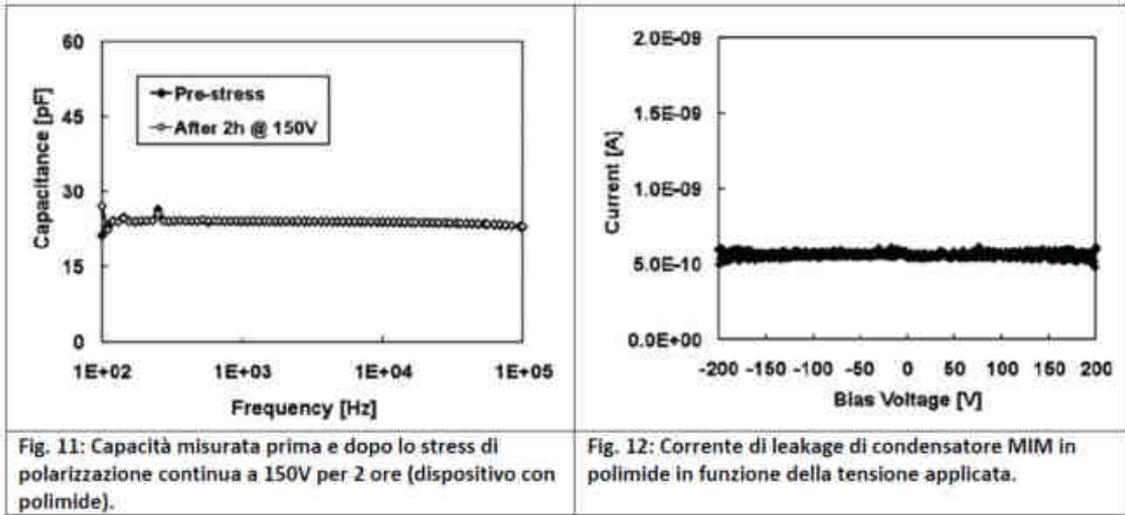
Fig. 10: Resistenza termica in funzione della potenza dissipata per un FET 4 x 75 um su pozzo di calore ideale e carrier CuW convenzionale (sinistra). Confronto fra la risposta al gradino ottenuta con il modello comportamentale Wiener e la soluzione FEM (destra; il tempo è in scala logaritmica).

**LINEA DI RICERCA AFFIDABILITÀ (RE)**

Nella presente linea di ricerca UR-PD e UR-MO hanno collaborato per mettere a punto metodologie per la valutazione della affidabilità dei dispositivi HEMT AlGaIn/GaN resi disponibili da SELEX-SI. L'analisi e le prove di laboratorio hanno permesso di confermare la presenza di meccanismi di degrado peculiari dei dispositivi su GaN, ad esempio il degrado associato ad alta dissipazione di potenza e alto campo elettrico.

**RE-WP.1 Affidabilità di dispositivi passivi**

UR-PD ha valutato innanzi tutto l'affidabilità di dispositivi passivi (condensatori su SiN, polimide e durimide) mediante misure CV. Come mostrato in Fig. 11 e Fig. 12 i condensatori presentano capacità costante e indipendente dalla frequenza dopo stress e corrente di perdita bassa e indipendente dalla tensione applicata.

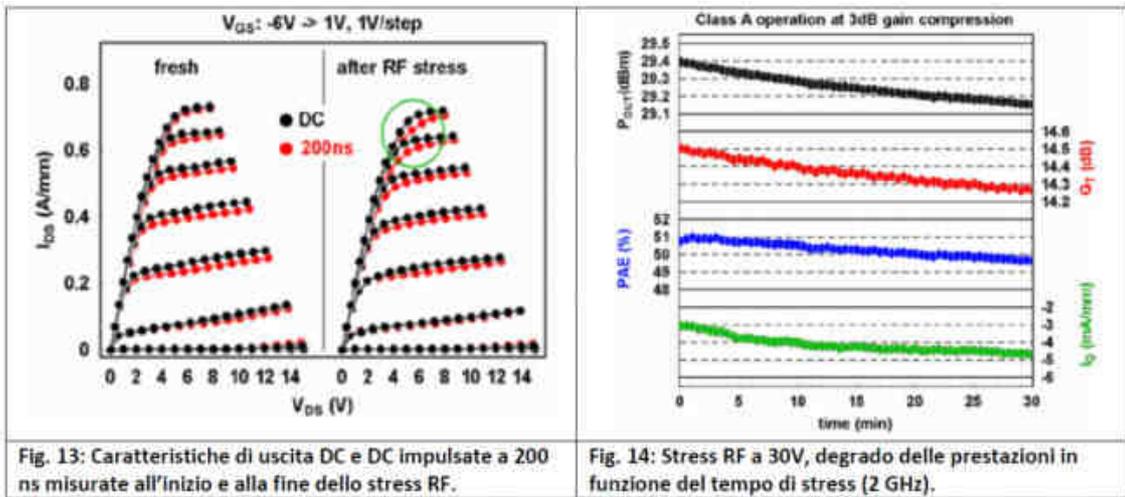


*RE-WP.2 Affidabilità e identificazione dei meccanismi di guasto*

In questo workpackage UR-MO e UR-PD hanno svolto una campagna di caratterizzazioni affidabilistiche DC e RF che hanno condotto ad una migliore comprensione dei meccanismi di guasto e ad un miglioramento della tecnologia.

UR-MO ha messo a punto nel corso del progetto un banco di misura per stress RF fino a 10 GHz. Tale banco è stato poi utilizzato per correlare stress DC e RF. I dispositivi testati sono stati HEMT in GaN cresciuti su SiC con periferie 4x25µm o 4x50µm. Le caratteristiche di uscita statiche e impulsate di un tipico dispositivo prima e dopo lo stress RF sono riportate in Fig. 13; Fig. 14 mostra invece il degrado delle prestazioni RF e della corrente di leakage di gate in funzione della durata dello stress a tensione di drain di 30 V.

Ulteriori test sullo stress RF da UR-MO hanno riguardato lo stress in condizioni di compressione e backoff, si è trovato che contrariamente alle aspettative i dispositivi sono meno soggetti a stress in compressione; si è rilevato che il meccanismo dominante della degradazione in backoff è la formazione di difetti al bordo del gate (tunneling di corrente), mentre in compressione si è ipotizzata una iniezione di elettroni nella regione accesso gate-drain, meccanismo lento che non agirebbe a RF. Dispositivi dello stesso lotto sono anche stati sottoposti a stress DC evidenziando un apprezzabile collasso di corrente post-stress



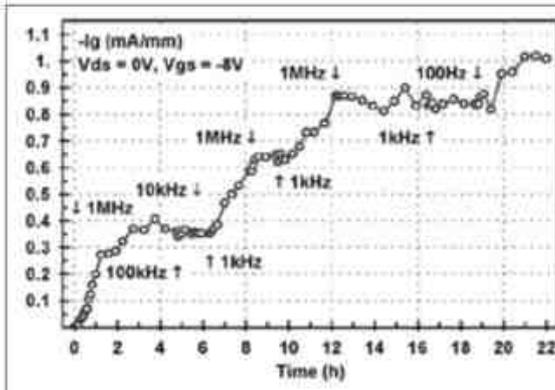


Fig. 15: Stress impulsati ottenuti applicando un'onda quadra di frequenza variabile in ingresso. La corrente di leakage aumenta al diminuire della frequenza.

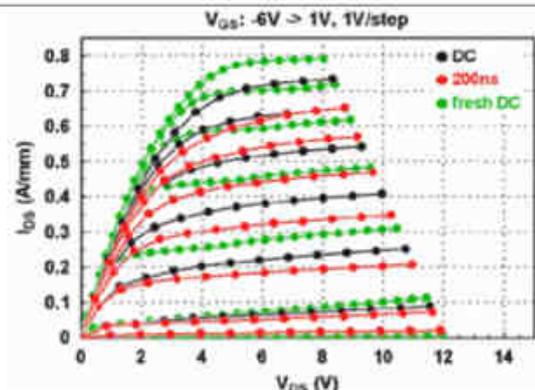


Fig. 16: Caratteristiche DC e impulsive su dispositivi sottoposti a stress in continua.

UR-MO ha poi effettuato analisi con spettroscopia DLTS su HEMT in GaN sottoposti a test di accumulo in continua e termico e test di stress RF allo scopo di interpretare il comportamento delle trappole. Dalle misure si è riscontrata la presenza di un fenomeno attivato termicamente con un energia di attivazione di 0.5 eV; l'interpretazione evidenzia che un aumento della densità di trappole, piuttosto che altri meccanismi, può essere considerato la causa del degrado osservato. Il meccanismo è stato confermato anche da simulazioni numeriche, cfr. la relazione di UR-MO per dettagli.

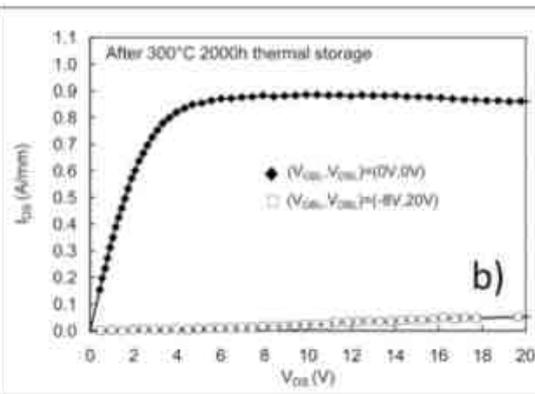
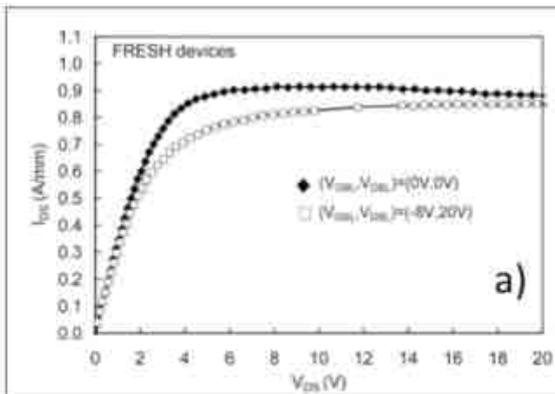


Fig. 17: a) ID-VDS dinamica per un dispositivo vergine; baseline considerate (0 V, 0 V) e (-8 V, 20 V); b) ID-VDS dinamica per un dispositivo sottoposto a storage; baseline considerate (0 V, 0 V) e (-8 V, 20 V).

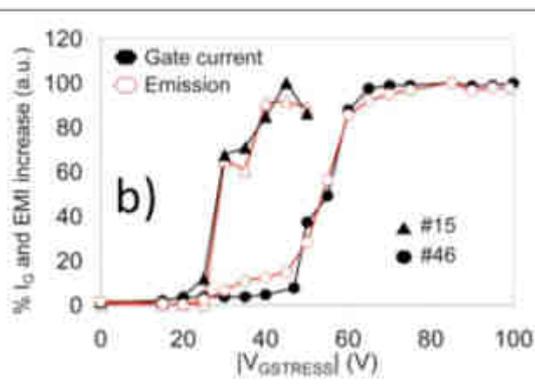
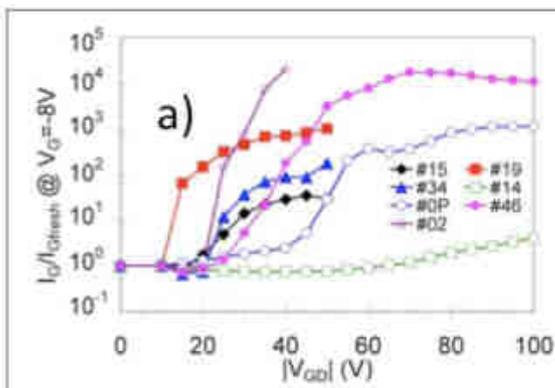


Fig. 18: (a) Rapporto tra la corrente di leakage di gate prima e dopo dello stress,  $I_{Gstress}/I_{Gfresh}$  (misurata a  $V_{GS} = -8V$ ), in funzione della tensione di stress per ogni step. (b) Correlazione tra l'aumento della corrente di gate e l'aumento dell'intensità luminosa per due campioni TLM rappresentativi appartenenti a due diversi wafer.

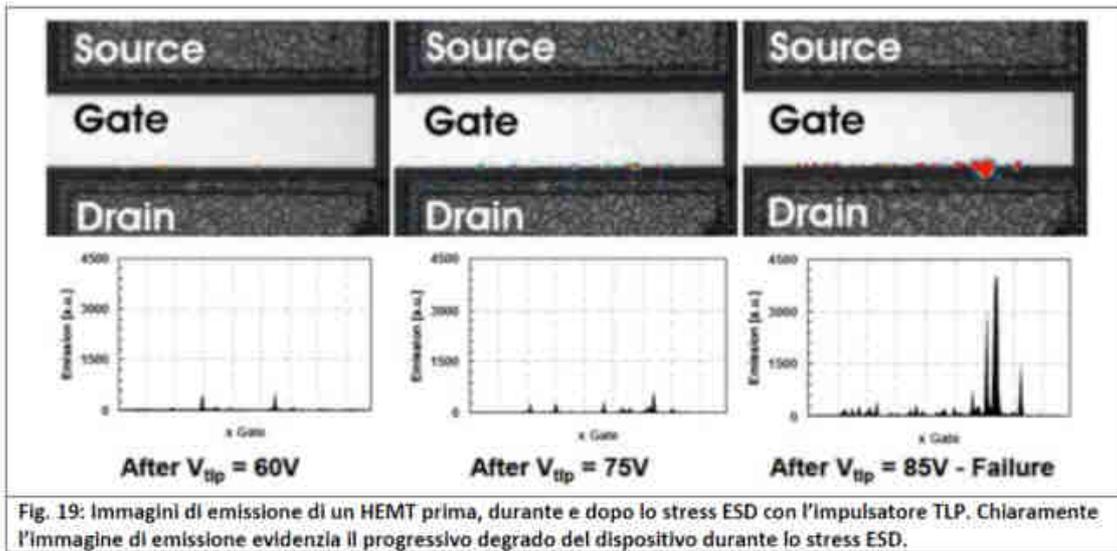


Fig. 19: Immagini di emissione di un HEMT prima, durante e dopo lo stress ESD con l'impulsore TLP. Chiaramente l'immagine di emissione evidenzia il progressivo degrado del dispositivo durante lo stress ESD.

L'attività di UR-PD ha incluso 3 compiti: storage termico, stress da elettroni caldi, scarica elettrostatica.

Per quanto riguarda lo storage termico, si è identificato un meccanismo di degradazione (Fig. 17) legato all'aumento della resistenza serie causata a sua volta da un aumento delle trappole superficiali. Tramite un'analisi al microscopio ottico dei dispositivi stressati si sono notati delle rotture e delle perdite di adesione dello strato di passivazione. Lo studio ha permesso di migliorare il processo di passivazione ottenendo così dispositivi che non presentano degrado. Per quanto riguarda l'effetto dello storage termico sui contatti ohmici e Schottky, diversi dispositivi sono stati analizzati (TLM, diodi Schottky, etc.) da UR-PD nelle stesse condizioni dei dispositivi HEMT sopra analizzati. Il limitato degrado della corrente di drain misurato negli HEMT sottoposti allo storage può essere associato alla stabilità dei contatti delle giunzioni ohmiche e del contatto Schottky di gate.

Per lo stress da elettroni caldi UR-PD ha misurato le caratteristiche elettriche e di elettroluminescenza di dispositivi sottoposti a stress, rilevando per dispositivi dello stesso wafer caratteristiche simili e riproducibili. Si è rilevata anche una correlazione forte fra degradazione e aumento della elettroluminescenza in punti di iniezione di corrente, cfr. Fig. 18.

L'analisi condotta da UR-PD relativamente alle scariche elettrostatiche (ESD) e all'overstress elettrico è particolarmente innovativa, in quanto pochissimi dati sono presenti in letteratura in merito agli HEMT su GaN. UR-PD ha effettuato una analisi completa sulla sensibilità ESD dei dispositivi su GaN attraverso una riproduzione di eventi ESD con tecniche TLP. Alle misure elettriche sono state affiancate misure di microscopio a emissione, cfr. Fig. 19. Per ulteriori dettagli cfr. la relazione di UR-PD.

## LINEA DI RICERCA CARATTERIZZAZIONE E MODELLI RF (CM)

### CM-WP.1 Caratterizzazione e modelli di elementi passivi (Mesi 1-12) (UR-PT, UR-TV)

UR-TV ha effettuato simulazioni EM di passivi concentrati SELEX-SI (induttori a spirale e condensatori di tipo MIM) attraverso strumenti di simulazione 2.5 D, con risultati in buon accordo con le caratterizzazioni. Nello stesso tempo UR-PT ha valutato strutture passive distribuite (coplanari e microstriscia) su GaN. Un esempio dei risultati ottenuti per la linea coplanare è mostrato in Fig. 20. UR-TV ha quindi effettuato una estensiva campagna di misure su wafer di passivi (Fig. 21) realizzati su substrato GaN/SiC di altezza pari a 70 um in microstriscia, con risultati in buon accordo con la libreria di foundry SELEX-SI.

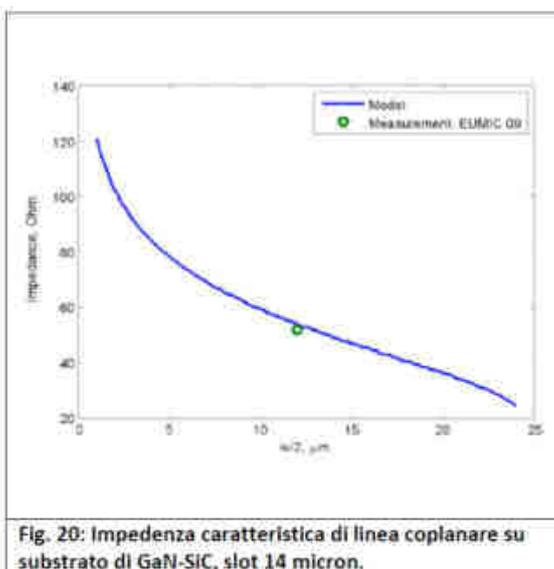


Fig. 20: Impedenza caratteristica di linea coplanare su substrato di GaN-SiC, slot 14 micron.

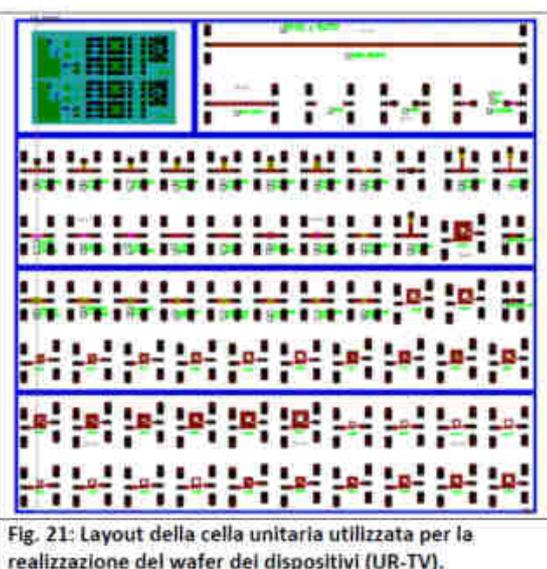


Fig. 21: Layout della cella unitaria utilizzata per la realizzazione del wafer dei dispositivi (UR-TV).

Nel corso del primo anno di attività si prevedeva di avere a disposizione HEMT SELEX-SI con lunghezza di gate pari a 0.15  $\mu\text{m}$ . Difficoltà tecnologiche incontrate dalla stessa fonderia hanno comportato la mancata disponibilità di tale famiglia di dispositivi. Avendo la fonderia SELEX-SI messo a disposizione dispositivi GaN HEMT su SiC con gate da 0.25  $\mu\text{m}$ , parzialmente compatibili con gli obiettivi del progetto, la campagna di caratterizzazione e di modellizzazione si è concentrata su di essi (con una revisione delle specifiche in frequenza dei dimostratori).

Nell'ambito del workpackage UR-MO, UR-PD e UR-TV hanno svolto misure DC, DC impulsive e di piccolo segnale su dispositivi HEMT AlGaIn/GaN di SELEX-SI. L'attività di UR-MO e UR-PD si è concentrata su aspetti di valutazione del dispositivo mentre quella di UR-TV è stata propedeutica allo sviluppo di modelli. Ci concentriamo qui sull'attività di UR-PD e di UR-TV.

UR-PD ha effettuato misure impulsive per valutare lo breakdown (ON e OFF state) dei dispositivi e ha accompagnato tali misure con analisi al microscopio ad emissione. Le misure IV DC hanno permesso di valutare la qualità "tecnologica" del transistor, mentre la riproducibilità nel wafer di tensione di pinch-off,  $I_{DSmax}$  gm... , sono stati correlati con la bontà dell'epitassia. L'analisi è stata completata da misure impulsive per valutare gli effetti termici e da intrappolamento di carica (vedi Fig. 22 e Fig. 23).

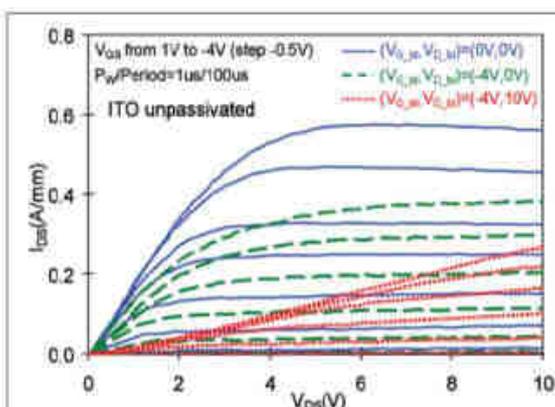


Fig. 22: Caratteristiche  $I_D$  vs  $V_{DS}$  impulsive di un GaN HEMT con distanza gate-drain LGD=3  $\mu\text{m}$ .

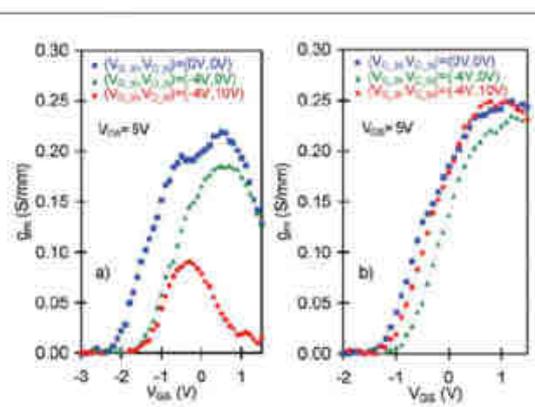


Fig. 23: Caratteristiche  $g_m$  vs  $V_{GS}$  impulsive di a) GaN HEMT non passivato; b) GaN HEMT passivato. Entrambi i dispositivi hanno una distanza gate-drain LGD=3  $\mu\text{m}$ .

UR-PD ha anche analizzato il comportamento dei dispositivi in termini di safe operating area (SOA), mediante misure impulsive (Fig. 24) attraverso sistema TLP (impulsi della durata di 100 ns), per evitare il burn-out termico dei dispositivi. L'analisi al microscopio ad emissione ha permesso di identificare focalizzazioni delle correnti in condizioni di pre-breakdown a canale aperto e chiuso (Fig. 25).

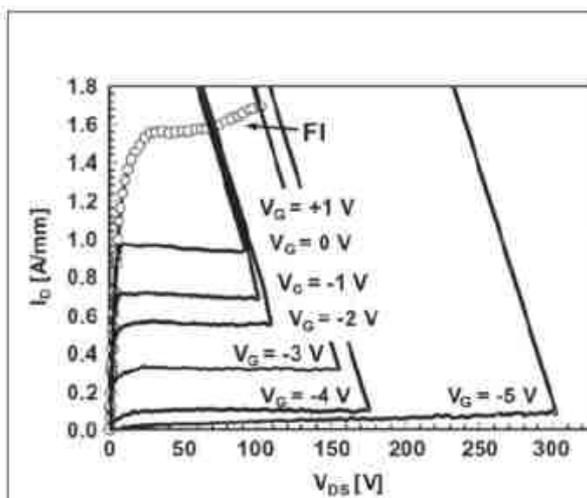


Fig. 24: Curve I-V misurate con impulsore TLP per valutare il breakdown dei dispositivi al variare della tensione di gate e con gate flottante (Curva FI) per emulare un evento di scarica elettrostatica. I GaN HEMTs analizzati in questa figura hanno larghezza  $W=800 \mu\text{m}$  e lunghezza di gate  $LG=0.5 \mu\text{m}$ .

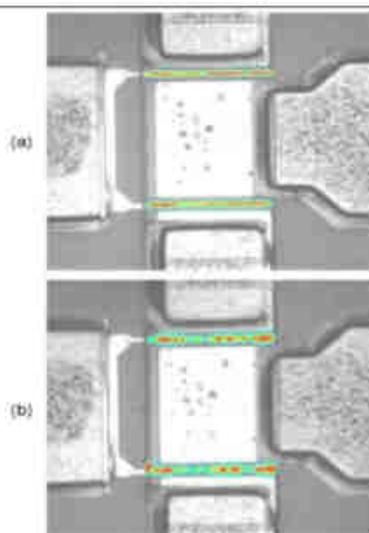


Fig. 25: Foto al microscopio ad emissione di un GaN HEMT (L'intensità della elettroluminescenza è mappata in "falsi colori"). (a) Dispositivo polarizzato in condizione di canale aperto  $V_{DS}=20 \text{ V}$ ,  $V_{GS}=0 \text{ V}$ ; (b) Dispositivo polarizzato in condizione di canale chiuso,  $V_{DS}=20 \text{ V}$ ,  $V_{GS}=-6 \text{ V}$ .

La campagna di caratterizzazione finalizzata al modeling condotta da UR-TV parte dall'individuazione di un dispositivo tipico da 0.25  $\mu\text{m}$  risultante dal run di fonderia da disposizione. A questo scopo sono state effettuate misure di piccolo segnale su vari dispositivi del quarto di fetta disponibile (vedi per i dettagli la

relazione di UR-TV). Al termine di tale campagna, sono stati scelti, per ciascuna geometria, i dispositivi rappresentativi medi; per dispositivi con diversa geometria (GaN HEMT da 10x100um, 2x50um, 4x50um, 4x75um e 8x75um) sono state effettuate misure delle caratteristiche di uscita in continua ed impulsate. Successivamente, sono state effettuate misure di parametri scattering multibias e misure a FET freddo per l'estrazione dei parassiti. Dall'insieme di tali misure saranno poi estratti i circuiti equivalenti a piccolo segnale multibias, base del circuito di ampio segnale. A titolo di esempio si riportano in Fig. 26 le caratteristiche impulsate di un dispositivo GaN HEMT da 10x100 um ed un set di parametri S dello stesso, in un punto di polarizzazione tipico ( $V_{ds}=20V$ ,  $I_d=30\%I_{dss}$ ).

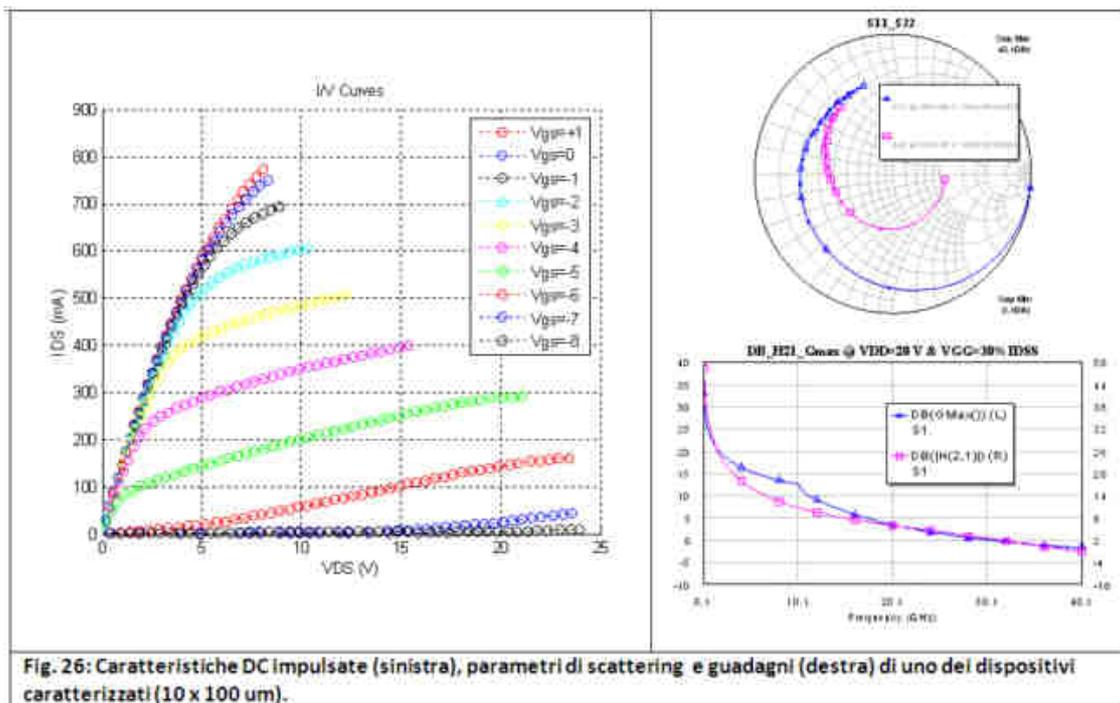


Fig. 26: Caratteristiche DC impulsate (sinistra), parametri di scattering e guadagni (destra) di uno dei dispositivi caratterizzati (10 x 100 um).

### CM-WP.3 Caratterizzazione di potenza di elementi attivi

La caratterizzazione di potenza ha impegnato UR-MO (misure di power sweep e load pull), UR-PD (power sweep), UR-PT (load pull finalizzato allo sviluppo del modello e del progetto del dimostratore). Mentre le attività di UR-MO e UR-PD sono maggiormente propedeutiche al tema della affidabilità RF, UR-PT si è strettamente interfacciata con UR-TV per lo sviluppo del modello di ampio segnale.

UR-PT ha svolto una campagna di misure di load-pull su dispositivi selezionati per i dimostratori allo scopo di individuare le condizioni di carico ottimo, rilevando buone prestazioni di potenza massima di uscita (dell'ordine di 4 W/mm a 3 dB di compressione di guadagno). Nel corso del secondo del secondo anno, si sono caratterizzati i dispositivi di periferia 4x50 micron (A4A) ed i dispositivi 4x75 micron (A4C) e 8x75 micron (A8C) del wafer SLX3\_05 effettuando misure di:

Parametri S fino a 18 GHz per due punti di lavoro ( $V_{DS} = 15 V$ ,  $I_{DS}=20\% I_{DSS}$ ) e ( $V_{DS}=15V$ ,  $I_{DS}=30\% I_{DSS}$ );

PIN-POUT alle frequenze di 4 GHz, 10 GHz e 16 GHz su carico resistivo di 50 Ohm;

Misure di load-pull alle frequenze di 4GHz, 10 GHz e 16 GHz per l'individuazione del carico ottimo di potenza per i due valori di bias precedentemente descritti;

PIN-POUT sul carico ottimo individuato attraverso le misure di load-pull alle frequenze di 4 GHz, 10 GHz e 16 GHz.

Le Fig. 27 e Fig. 28 mostrano a titolo di esempio due mappe load pull (potenza e efficienza, A4C).

I dispositivi A4A, A4C e A8C) sono stati caratterizzati in potenza per due polarizzazioni in classe AB alle frequenze fondamentali di 4 GHz, 10 GHz e 16 GHz. In Fig. 29 è mostrato ad esempio per il dispositivo A4C alla frequenza fondamentale 16 GHz in classe AB ( $V_{DS} = 15 V$ ,  $I_{DS}=20\% I_{DSS}$ ) il confronto tra gli sweep su 50 ohm e sul carico ottimo di potenza (curve più alte), mentre in Fig. 30 tale confronto è effettuato, sempre a 10 GHz, per il dispositivo A8C ( $V_{DS} = 15 V$ ,  $I_{DS}=30\%I_{DSS}$ ), coefficiente di riflessione del carico  $0.34 < 21^\circ$ .

Vengono qui riportati in dettaglio i risultati relativi al dispositivo A4C, utilizzato per il progetto del dimostratore di DD-WP.2. Dalla Tabella 1 si nota un guadagno di potenza che passa da 18 dB a 4 GHz a 14 dB a 10 GHz per mantenersi accettabile anche per la frequenza massima di 16 GHz (superiore a 8 dB).

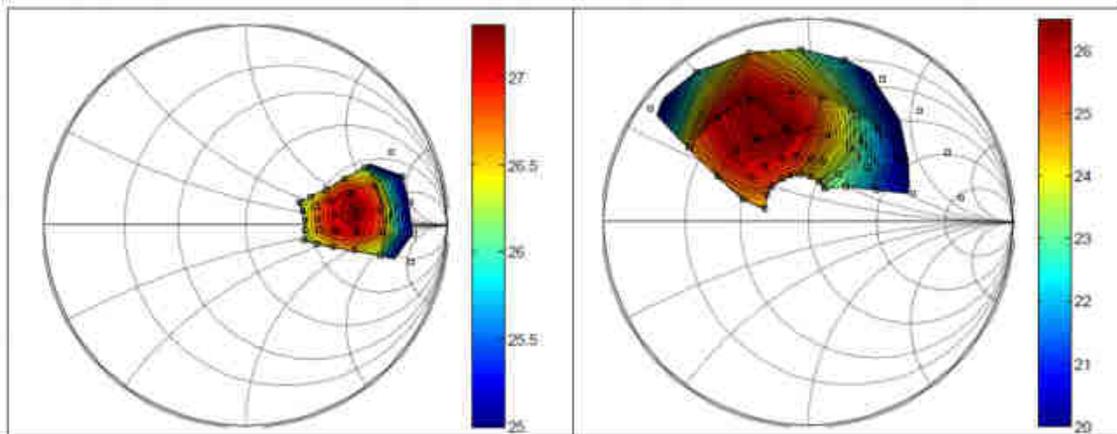


Fig. 27: Piano  $G_1$  :  $P_{OUT}$  contour plot per 3dB di compressione di guadagno alla frequenza fondamentale di 4 GHz per il dispositivo A4C polarizzato in classe AB,  $V_{DS} = 15$  V,  $I_{DS} = 20\% I_{DSS}$  (86 mA) i quadrati indicano i carichi sintetizzati dal sistema di load-pull.

Fig. 28: Piano  $G_1$  : Contour plot di efficienza per 2 dB di compressione di guadagno alla frequenza fondamentale di 16 GHz per il dispositivo ABC polarizzato in classe AB,  $V_{DS} = 15$  V,  $I_{DS} = 30\% I_{DSS}$ ; i quadrati indicano i carichi sintetizzati dal sistema di load-pull.

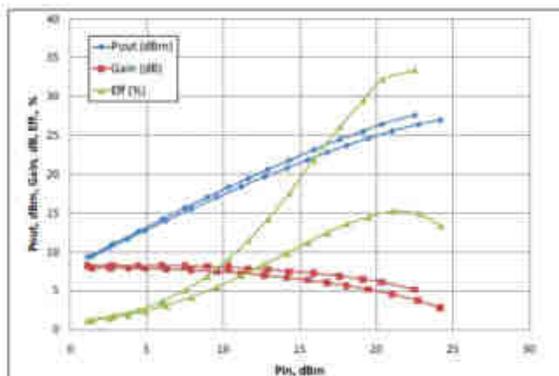


Fig. 29: Power sweeps alla frequenza fondamentale di 16 GHz per il dispositivo "A4C" polarizzato in classe AB ( $V_{DS} = 15$  V,  $I_{DS} = 20\% I_{DSS}$ ) su carico pari a 50 ohm (curve inferiori per ogni simbolo) e sul carico ottimo di potenza (curve superiori). Sono mostrate  $P_{OUT}$ , Guadagno e efficienza di drain.

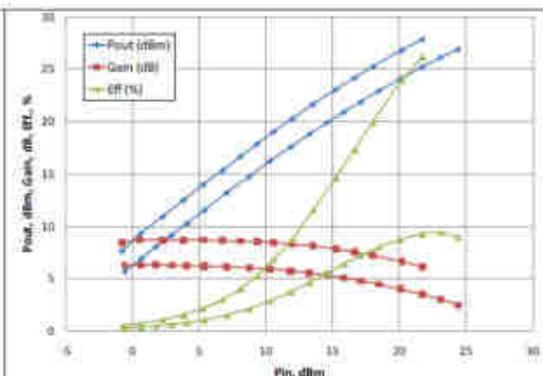


Fig. 30: Power sweeps alla frequenza fondamentale di 16 GHz per il dispositivo "ABC" polarizzato in classe AB ( $V_{DS} = 15$  V,  $I_{DS} = 30\% I_{DSS}$ ) su carico pari a 50 ohm (curve inferiori per ogni simbolo) e sul carico ottimo di potenza (curve superiori). Sono mostrate  $P_{OUT}$ , Guadagno e efficienza di drain.

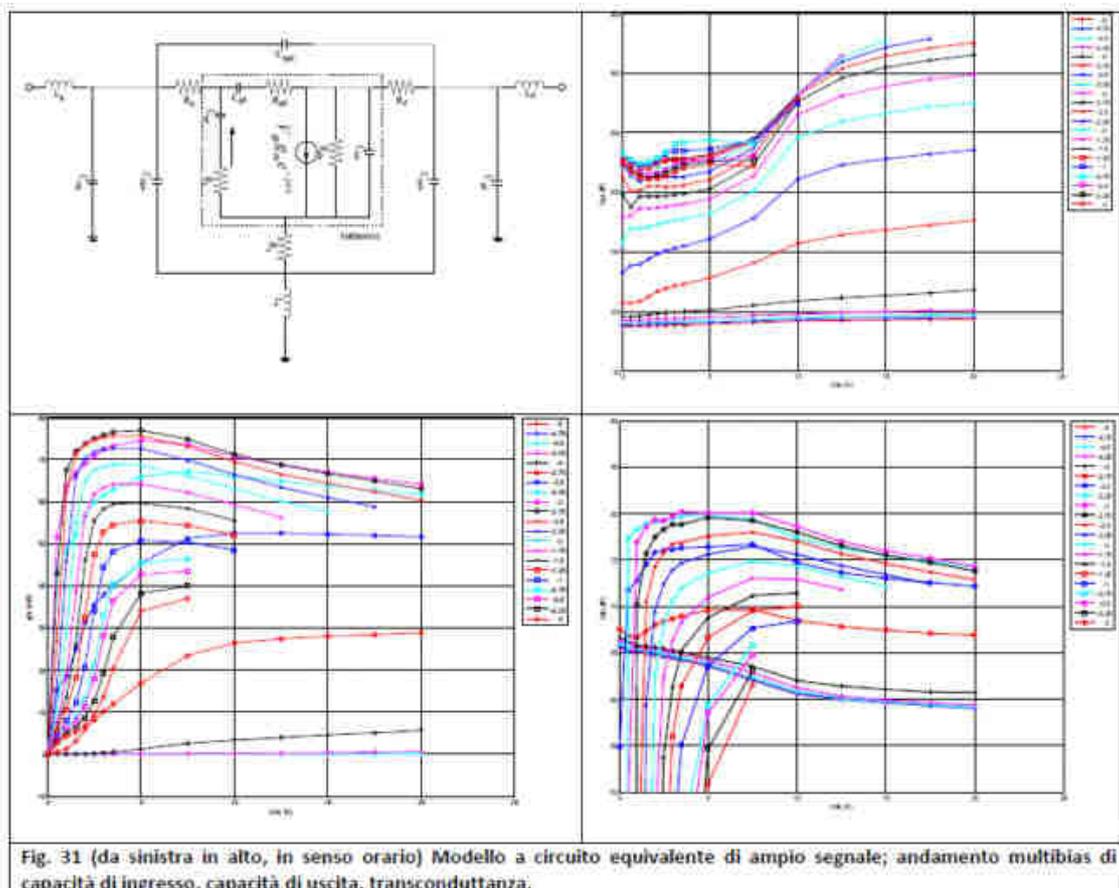
Frequenza di lavoro, GHz	$I_b$ , mA	Guadagno di piccolo segnale, dB	$P_{out}$ a 3 dB di compress.	PAE a 3 dB di compress.	$P_{out}$ sat (5 dB compress.)	Gamma <sub>r</sub>
4	41	18	27.8	48	27.9	0.55 3°
4	86	17.7	27.8	46	28	0.54 4°
10	41	14	26	36	27.8	0.5 51°
10	86	12.6	27.7	38	28.3	0.53 47°
16	41	8.2	27.6	33.3	27.7	0.58 66°
16	86	7.4	27.5	23	27.5	0.39 39°

Tabella 1: Cella B2, dispositivo A4C. Riassunto delle performance su carico ottimo di potenza al variare della frequenza per i due punti di polarizzazione in classe AB concordati ( $V_{DS} = 15$  V,  $I_{DS} = 20\% I_{DSS}$  e  $V_{DS} = 15$  V,  $I_{DS} = 30\% I_{DSS}$ ). Delle due polarizzazioni quella con corrente maggiore ha guadagno leggermente minore. L'efficienza saturata passa da più del 50 % a 4 GHz a poco più di 30 % a 16 GHz per  $I_{DS} = 20\% I_{DSS}$ .

Sulla base delle misure di load pull e delle misure DC e SS eseguite da UR-TV si è estratto un modello ADS per i dispositivi che sarebbero stati utilizzati in fase di progetto, modello che è stato ulteriormente rifinito per la messa a punto del modello elettrotermico che include il modello termico Wiener già in precedenza descritto.

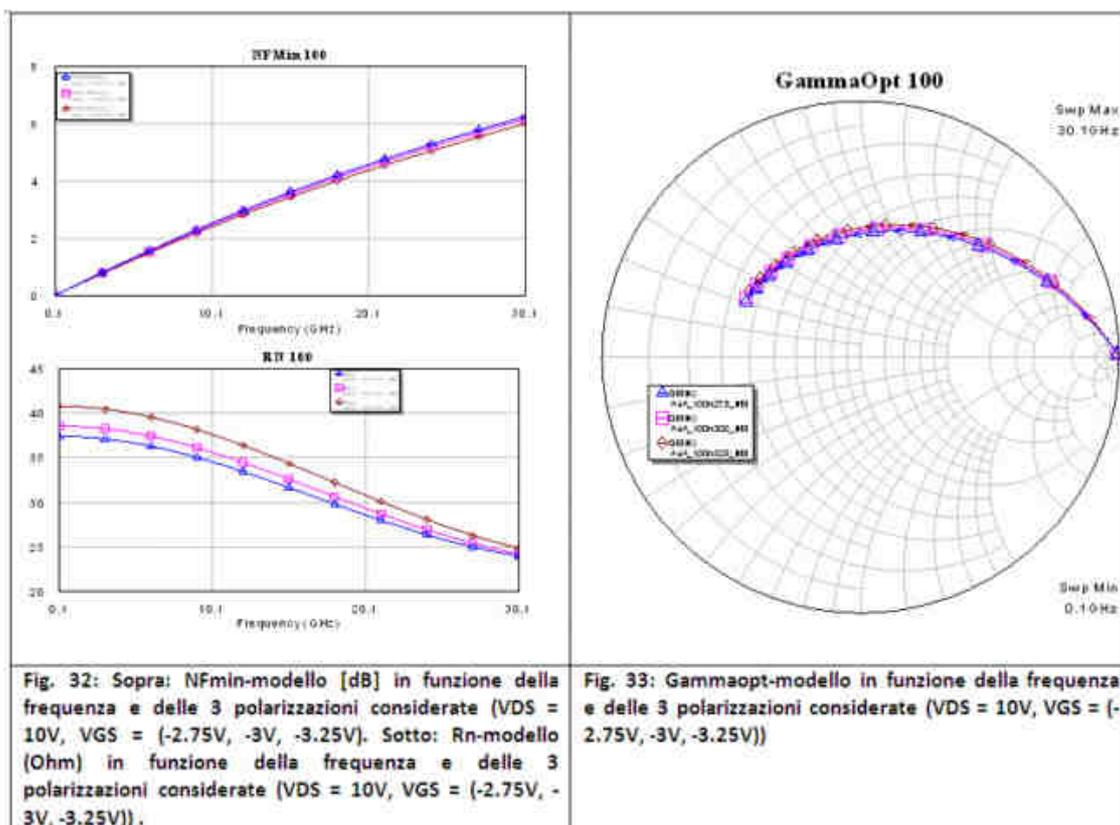
CM-WP.4 Modellistica ad ampio segnale degli elementi attivi

UR-TV e UR-PT hanno collaborato nello sviluppo di un modello di ampio segnale in ambiente ADS e AWR basato su misure DC e SS multibias (UR-TV), misure di load-pull e potenza (UR-PT) e infine completato nella parte elettrotermica (UR-PT) mediante l'accoppiamento con il modello termico di Wiener. La topologia del circuito UR-TV è mostrata nella Fig. 31; i modelli degli elementi non lineari derivano da un approccio che utilizza un modello di tipo Angelov (Chalmers). L'implementazione adottata da UR-PT mediante modelli definiti dall'utente in ADS con accoppiamento elettrotermico è strettamente analoga.



#### CM-WP.4 Caratterizzazione e modelli di rumore di elementi attivi

La caratterizzazione di rumore è stata effettuata da UR-TV mediante l'uso del modello a due temperature (di drain e di gate) per descrivere le sorgenti di rumore intrinseche, mentre le estrinseche sono state associate alle resistenze parassite. I parametri di rumore sono stati identificati mediante misure di cifra di rumore su 50 Ohm. Nell'estrazione dei modelli di rumore e nella caratterizzazione si è scelto di investigare soltanto dispositivi di periferia ridotta (A4A, A4C e A8C, di periferia 200, 300 e 600 um), più adatti ad applicazioni low noise. Nel seguito si riportano i risultati dell'estrazione per il dispositivo A4A utilizzato nel dimostratore: la cifra di rumore minima ( $F_{min}$ ), resistenza di rumore ( $R_n$ ) carico ottimo di rumore in ingresso ( $\Gamma_{opt}$  in modulo e fase su carta di Smith), considerando soltanto tre delle polarizzazioni esaminate (cfr. Fig. 32 e Fig. 33).



#### LINEA DI RICERCA PROGETTO DI DIMOSTRATORI (DD)

Il progetto dei dimostratori ha dovuto confrontarsi con la mancata disponibilità della tecnologia SELEX da 150 nm. Pur con queste limitazioni i risultati ottenuti (amplificatore a larga banda a basso rumore e di potenza) sono interessanti e allo stato dell'arte.

#### DD-WP.1 Progetto di dimostratori LNA

Per sfruttare al meglio le potenzialità della tecnologia SELEX disponibile da 0.25 um la UR-TV ha progettato uno LNA distribuito a larga banda 2-18 GHz, banda di particolare interesse nelle applicazioni EW e ECM, a 5 stadi. Il dispositivo selezionato è stato l'A4A, con caratteristiche in Fig. 34. Il progetto è stato realizzato in forma monolitica utilizzando componenti passivi della libreria SELEX, con un'area totale di 6 mm<sup>2</sup>. Le prestazioni sono riportate nelle figure che seguono. La riflessione sia in ingresso (Fig. 35) che in uscita dall'amplificatore rimane inferiore a -10 dB; il guadagno (Fig. 36) è poco inferiore ai 10 dB e la cifra di rumore conseguente (Fig. 37) inferiore a 6 dB, salvo che all'estremo superiore. Il layout è mostrato nella Fig. 38.

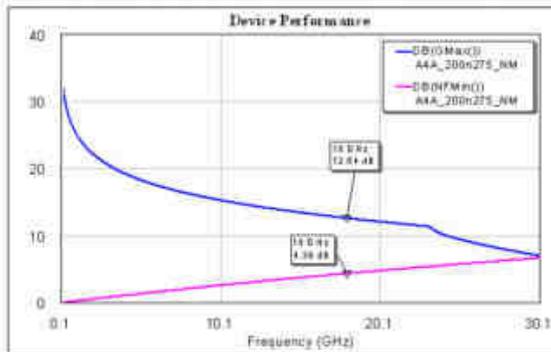


Fig. 34: Prestazioni del dispositivo A4A in rumore e guadagno nella gamma di frequenze 0.1-22 GHz.

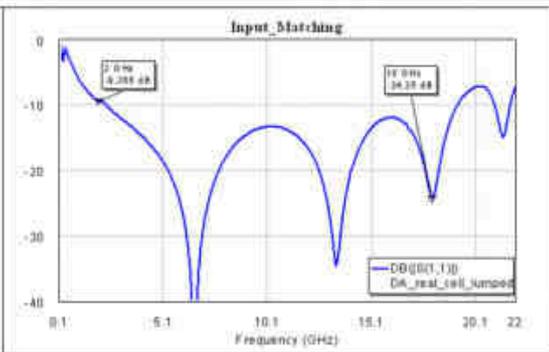


Fig. 35: Adattamento in ingresso LNA nella gamma di frequenze 0.1-22 GHz.

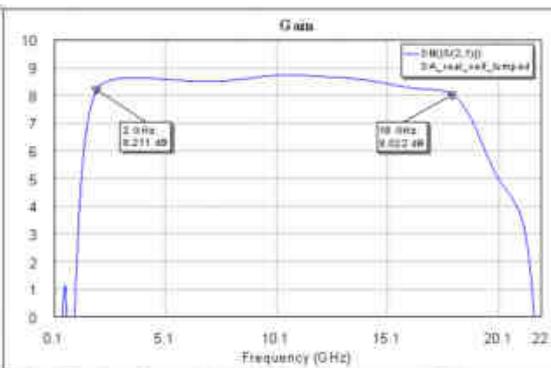


Fig. 36: Guadagno LNA (dB) nella gamma di frequenze 0.1-22 GHz.

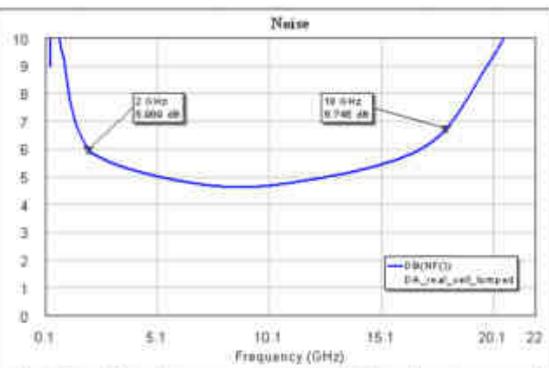


Fig. 37: Cifra di rumore LNA (dB) nella gamma di frequenze 0.1-22 GHz.

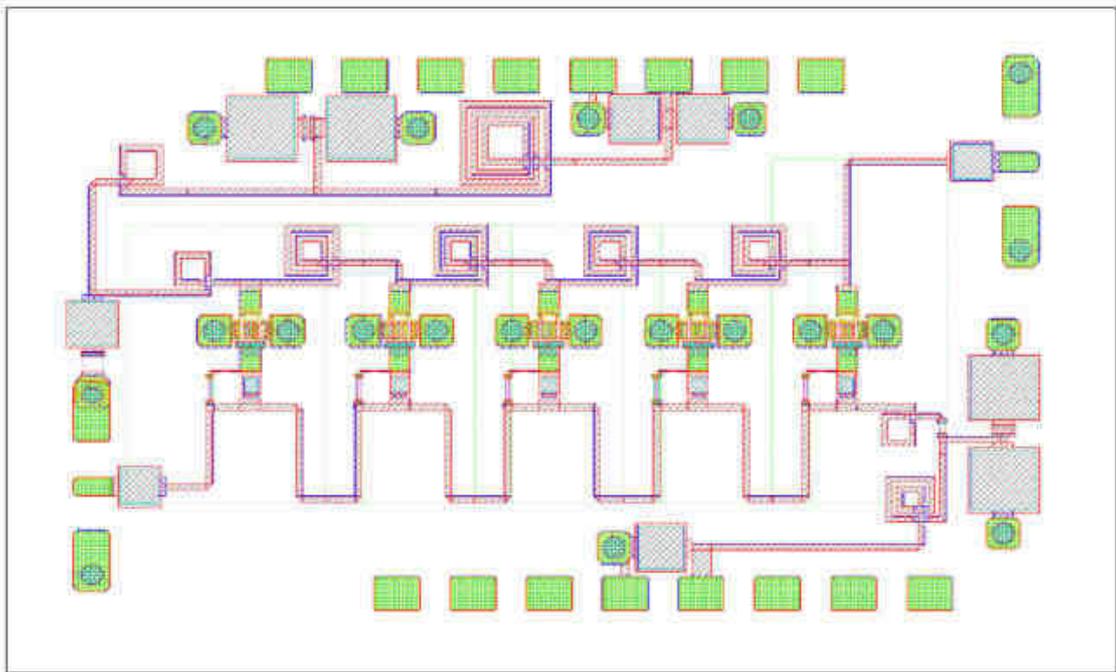


Fig. 38: Layout dell'amplificatore a basso rumore distribuito progettato. Le dimensioni del chip sono di 3175 x 1980  $\mu\text{m}$ .

discussione in [1], sono necessarie per un PA distribuito tecniche di progetto dedicate, che consentano non solo l'equalizzazione del guadagno in banda, ma anche la costanza della retta di carico equivalente che deve essere presentata a ciascun dispositivo attivo, perché essi raggiungano in condizioni di sincronismo la massima potenza disponibile. I dispositivi utilizzati nel progetto definitivo sono 5 transistori A4C, per una periferia totale di 1.5 mm e una potenza di uscita (teorica) in classe A di 5 W (si tenga conto che la sovrastima della potenza di uscita è necessaria poiché difficilmente l'amplificatore distribuito raggiunge efficienze migliori del 20%). Sono quindi state progettate in forma distribuita le linee artificiali di gate e drain, e l'amplificatore è stato infine sottoposto ad una ottimizzazione globale. Il progetto è stato condotto utilizzando un modello Angelov elettro-termico fittato su misure di piccolo segnale (UR-TV) e potenza (UR-PT) con una parte termica comportamentale Wiener (UR-PT). I risultati del progetto sono riportati qui di seguito. Fig. 40 mostra le condizioni di adattamento di ingresso e di uscita dell'amplificatore distribuito. Fig. 41 riporta le prestazioni di potenza e il guadagno dell'amplificatore nella banda di frequenza 6-18 GHz e (Fig. 42) in funzione della potenza di ingresso. Le prestazioni di potenza risultano lievemente al di sotto della specifica richiesta dal progetto, con un massimo di potenza sulla banda pari a 31 dBm. Fig. 43 riporta infine il layout complessivo del DPA. Complessivamente quindi gli obiettivi di guadagno e banda sono rispettati, mentre la potenza massima, per quanto abbastanza costante in banda, resta leggermente inferiore a quella desiderata.

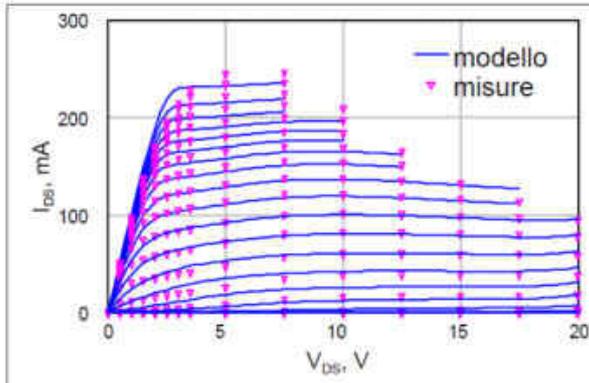


Fig. 39: Confronto del modello nonlineare statico con le caratteristiche statiche misurate per il dispositivo A4C della GaN SLX 3\_05

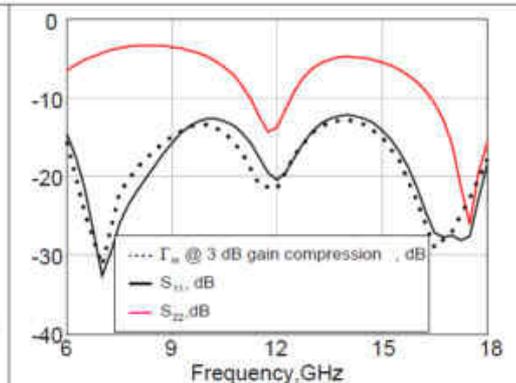


Fig. 40: Adattamento di ingresso (sia in piccolo segnale che in potenza) e di uscita dell'amplificatore distribuito

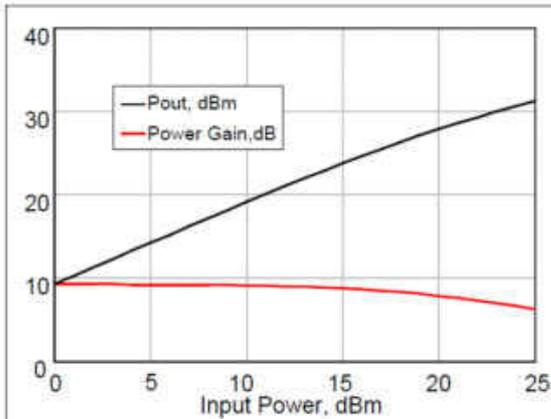


Fig. 41: Guadagno di potenza e potenza di uscita al variare della potenza disponibile in ingresso

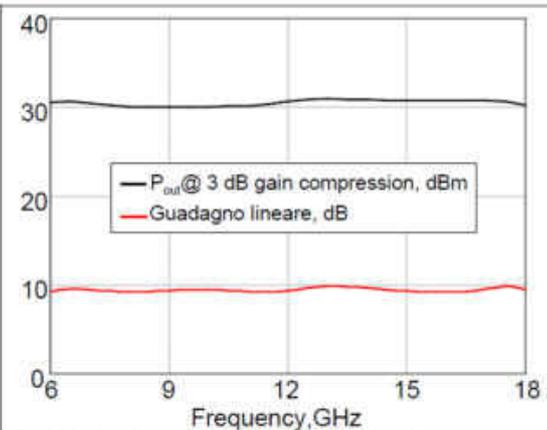


Fig. 42: Guadagno lineare e potenza di uscita in condizioni di ampio segnale (3 dB di compressione) sulla banda di lavoro

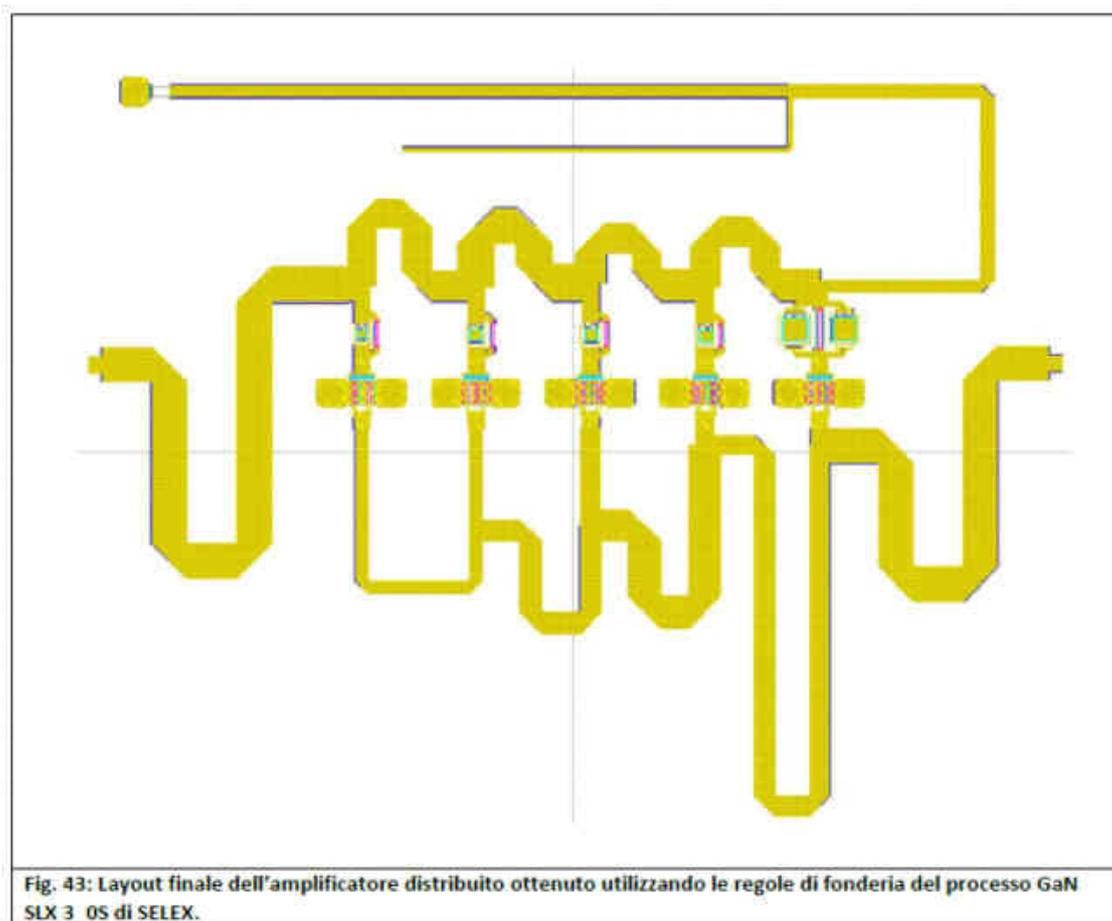


Fig. 43: Layout finale dell'amplificatore distribuito ottenuto utilizzando le regole di fonderia del processo GaN SLX 3\_05 di SELEX.

## RIFERIMENTI

[1] Campovecchio et. al., *Int. J. Microwave MM-Wave Computer-Aided Eng.*, Vol. 6, NO. 4, 259-269 (1996)

## 12. Problemi riscontrati nel corso della ricerca

Come si evince chiaramente dalla relazione finale del progetto, tutti i punti previsti nel corso dello sviluppo sono stati oggetto di investigazione, con risultati di notevole interesse scientifico ed applicativo, e con ricadute importanti sulla tecnologia SELEX-SI, soprattutto per quanto riguarda gli aspetti affidabilistici e di progetto del dispositivo. Va peraltro segnalato che lo sviluppo della tecnologia EBL in grado di portare a lunghezze di gate dell'ordine di 150 nm presso SELEX-SI è stato meno rapido di quanto sperato ad inizio progetto. La generazione di dispositivi effettivamente operanti e utilizzabili per il progetto di dimostratori si è quindi attestata su lunghezze di gate di 250 nm, con prestazioni in frequenza adeguate a realizzare progetti fino alla banda K. Si è quindi chiaramente investito il campo delle microonde, ma, perlomeno nella fase realizzativa e di caratterizzazione (discorso diverso vale per le attività di modeling fisico e termico, comunque applicabili anche nella gamma millimetrica) non si sono potuti implementare dimostratori che coprissero il campo delle onde millimetriche. La riduzione degli obiettivi in frequenza è stata peraltro in parte compensata da una rivisitazione delle specifiche dei dimostratori, per i quali si sono cercate soluzioni a larghissima banda, basate sull'approccio distribuito, con risultati decisamente interessanti.

## 13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate (da consuntivo)

	(mesi uomo)
<b>TOTALE</b>	<b>136</b>
da personale universitario	136
altro personale	92
Personale a contratto a carico del PRIN 2007	19

## 14. Modalità di svolgimento (dati complessivi)

**Partecipazioni a convegni:**

	<b>Già svolti (numero)</b>	<b>Da svolgere (numero)</b>	<b>Descrizione</b>
<b>in Italia</b>	7	0	<i>I risultati della ricerca sono stati presentati in un certo numero di congressi nazionali (tra i quali le riunioni annuali del gruppo elettronica GE).</i>
<b>all'estero</b>	25	0	<i>La partecipazione a convegni internazionali puo' essere dedotta in dettaglio dalla documentazione delle singole unita' di ricerca. I risultati della ricerca sono stati presentati in sedi internazionali prestigiose come si puo' evincere dai lavori scientifici presentati a congresso elencati da ciascuna unita'.</i>
<b>TOTALE</b>	<b>32</b>	<b>0</b>	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

**Articoli pertinenti pubblicati:**

	<b>Numero</b>	<b>Descrizione</b>
<b>su riviste italiane con referee</b>	1	<i>La descrizione dettagliata dei contributi e' reperibile nell'elenco delle pubblicazioni delle singole unita' di ricerca.</i>
<b>su riviste straniere con referee</b>	27	<i>La descrizione dettagliata dei contributi e' reperibile nell'elenco delle pubblicazioni delle singole unita' di ricerca.</i>
<b>su altre riviste italiane</b>	0	
<b>su altre riviste straniere</b>	0	
<b>comunicazioni a convegni/congressi internazionali</b>	50	<i>La descrizione dettagliata dei contributi e' reperibile nell'elenco delle pubblicazioni delle singole unita' di ricerca.</i>
<b>comunicazioni a convegni/congressi nazionali</b>	0	
<b>rapporti interni</b>	5	<i>L'unita' di ricerca di Padova ha prodotto rapporti interni dettagliati di attivita' su alcune campagne di caratterizzazione effettuate nell'ambito del tema Reliability.</i>
<b>brevetti depositati</b>	0	
<b>TOTALE</b>	<b>83</b>	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Data 11/12/2010 12:37

Firma .....

Si autorizza alla elaborazione e diffusione delle informazioni riguardanti i programmi di ricerca presentati ai sensi del D. Lgs. n. 196/2003 del 30.6.2003 sulla "Tutela dei dati personali". La copia debitamente firmata deve essere depositata presso l'Ufficio competente dell'Ateneo.