



Stasera parliamo di

Amplificatori RF di Potenza a MOSFET

05/12/2025 © ARI Sezione di Pisa - i5WHC



Uno dei dubbi più diffusi tra chi deve affrontare la scelta per l'acquisto o la realizzazione di un PA è quella relativa alla scelta della tecnologia.

Affidarsi ai vecchi e cari «tubi» o ai più moderni dispositivi allo stato solido come «LDMOS».

In entrambi i casi ci sono motivazioni a favore e contro, pregi e difetti dei tubi sono abbastanza noti, meno noti sono quelli relativi ai dispositivi allo stato solido

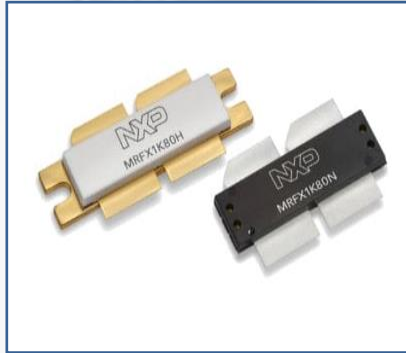
Quello che vorremmo fare stasera è dare qualche informazione in più per una corretta valutazione

Elementi fondamentali



Questi sono due dispositivi tra quelli più utilizzati nei PA presenti nei nostri shack

Entrambi sono in grado di erogare all'incirca la stessa potenza ma il modo con cui lo fanno è molto diverso



Proviamo adesso ad elencare quali sono le principali caratteristiche di ciascuno e le differenze che li caratterizzano

Elementi fondamentali

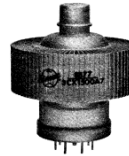


TECHNICAL DATA

8877
3CX1500A7
HIGH-MU
POWER TRIODE

The EIMAC 8877/3CX1500A7 is a rugged ceramic/metal power triode designed for use as a cathode driven Class AB₂ amplifier in audio or radio frequency applications. The tube is recommended for linear amplifier service since high power gain may be obtained without sacrifice of low intermodulation distortion characteristics.

Low grid interception and high amplification factor combine to make the 8877/3CX1500A7 drive requirements exceptionally low for a tube of this power capacity.



GENERAL CHARACTERISTICS¹

RADIO FREQUENCY LINEAR AMPLIFIER CATHODE DRIVEN Class AB₂

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

DC PLATE VOLTAGE	4000 VOLTS
DC PLATE CURRENT	1.0 AMPERE
PLATE DISSIPATION	1500 WATTS
GRID DISSIPATION	25 WATTS

TYPICAL OPERATION (Frequencies to 30 MHz) Class AB₂ Cathode Driven, Peak Envelope or Modulation Crest Conditions

Plate Voltage	2700	3500 Vdc
Grid Voltage ¹	-8.2	-8.2 Vdc
Zero-Signal Plate Current	92	182 mA _{dc}
Single-Tone Plate Current	740	1000 mA _{dc}
Two-Tone Plate Current	480	675 mA _{dc}
Single-Tone Grid Current ³	40	74 mA _{dc}
Two-Tone Grid Current ³	16	25 mA _{dc}
Peak rf Cathode Voltage ³	68	81 v
Peak Driving Power ²	40	64 w

Single-Tone Useful Output Power	1085	2075 W
Resonant Load Impedance	1820	2000 Ω
Intermodulation Distortion Products ²		
3rd Order	-40	-38 db
5th Order	-41	-41 db

1. Positive cathode bias provided by zener diode.
2. The intermodulation distortion products are referenced against one tone of a two equal tone signal.
3. Approximate values.

TYPICAL OPERATION (220 MHz) Class AB₂ Cathode Driven

Plate Voltage	2500 Vdc
Grid Voltage ¹	-8.2 Vdc
Plate Current	1000 mA _{dc}
Grid Current	10 mA _{dc}
Useful Output Power	1620 W
Driving Power ²	57 W
Power Gain	14 db

1. Positive cathode bias provided by zener diode.
2. Approximate value.

Come riportato nel datasheet Eimac 3CX1500A7 è un triodo ceramico che ha una dissipazione anodica massima di 1500W.

Con una tensione di placca di 3500V e un assorbimento di 1A è capace di erogare, in configurazione *ground-grid* in classe AB₂, una potenza massima di 2000W fino a 250 MHz con una impedenza di uscita di circa 2000 ohm.

Elementi fondamentali

NXP Semiconductors
Technical Data

RF Power LDMOS Transistor
High Ruggedness N-Channel
Enhancement-Mode Lateral MOSFET

This high ruggedness device is designed for use in high VSWR industrial, medical, broadcast, aerospace and mobile radio applications. Its unmatched input and output design supports frequency use from 1.8 to 400 MHz.

Typical Performance

Frequency (MHz)	Signal Type	V _{DD} (V)	P _{out} (W)	G _{ps} (dB)	η_D (%)
27 (1)	CW	65	1800 CW	27.8	75.6
64	Pulse (100 μ s, 10% Duty Cycle)	65	1800 Peak	27.1	69.5
81.36	CW	62	1800 CW	25.1	78.7
87.5-108 (9.3)	CW	60	1600 CW	23.6	82.5
123/128	Pulse (100 μ s, 10% Duty Cycle)	65	1800 Peak	25.9	69.0
144	CW	65	1800 CW	23.5	78.0
175	CW	60	1560 CW	23.5	75.9
174-230 Doherty (9)	DVB-T (Bk OFDM)	63	250 Avg.	21.3	43.3
230 (4)	Pulse (100 μ s, 20% Duty Cycle)	65	1800 Peak	25.1	75.1
325	Pulse (12 μ s, 10% Duty Cycle)	63	1700 Peak	22.8	64.9

Load Mismatch/Ruggedness

Frequency (MHz)	Signal Type	VSWR	P _{in} (W)	Test Voltage	Result
230 (4)	Pulse (100 μ s, 20% Duty Cycle)	> 65:1 at all Phase Angles (3 dB Overdrive)	14 Peak	65	No Device Degradation

1. Measured in 27 MHz reference circuit (page 6).
2. Measured in 87.5-108 MHz broadband reference circuit (page 11).
3. The values shown are the center band performance numbers across the indicated frequency range.
4. Measured in 230 MHz production test fixture (page 17).

Features

- Unmatched input and output allowing wide frequency range utilization
- Device can be used single-ended or in a push-pull configuration
- Qualified up to a maximum of 65 V_{DD} operation
- Characterized from 30 to 65 V for extended power range
- High breakdown voltage for enhanced reliability
- Suitable for linear application with appropriate biasing
- Integrated ESD protection with greater negative gate-source voltage range for improved Class C operation
- Lower thermal resistance option in over-molded plastic package: MRFX1K80N
- Included in NXP product longevity program with assured supply for a minimum of 15 years after launch

Typical Applications

- Industrial, scientific, medical (ISM)
 - Laser generation
 - Plasma generation
 - Particle accelerators
 - MRI, RF ablation and skin treatment
 - Industrial heating, welding and drying systems
- Radio and VHF TV broadcast
 - Aerospace
 - HF communications
 - Radar

Document Number: MRFX1K80H
Rev. 1, 09/2018
V_{RoHS}

MRFX1K80H

1.8-400 MHz, 1800 W CW, 65 V
WIDEBAND
RF POWER LDMOS TRANSISTOR

NI-1230H-4S

Note: The backside of the package is the source terminal for the transistor.

Figure 1. Pin Connections

Come riportato nel datasheet NXP MRFX1K80H è un doppio LDMOSFET che ha una dissipazione massima di 2240W. Con una tensione di drain di 65V e un assorbimento di 36A è capace di erogare, in configurazione *push-pull* in classe B, una potenza massima di 1800W fino a 400 MHz con una impedenza di uscita di circa 5 ohm.

Vengono commercializzate due diverse versioni: *MRFX1K80H* con case ceramico e fissaggio meccanico e *MRFX1K80N* con case plastico e fissaggio a «saldare» vedremo più avanti quali sono le differenze



Elementi fondamentali



Sebbene questi due dispositivi, se correttamente impiegati, siano in grado di fornire prestazioni equivalenti, già dall'esame dei parametri elettrici fondamentali si evidenziano enormi differenze che andremo a evidenziare meglio più avanti.

C'è una convinzione abbastanza diffusa ovvero che i dispositivi allo stato solido siano intrinsecamente molto più delicati rispetto ai tubi.

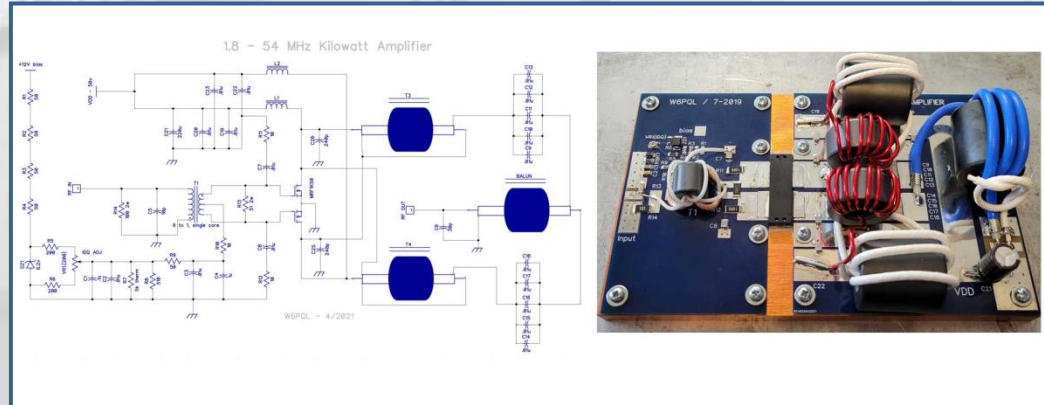


In realtà ciò, come vedremo, deriva non tanto da una caratteristica intrinseca dei dispositivi stessi ma piuttosto dalle condizioni di impiego che devono necessariamente essere diverse ma di cui spesso si tiene poco conto probabilmente perché alcuni aspetti funzionali dei dispositivi allo stato solido sono meno noti rispetto ai tubi.

Caratteristiche generali dei PA a MOSFET



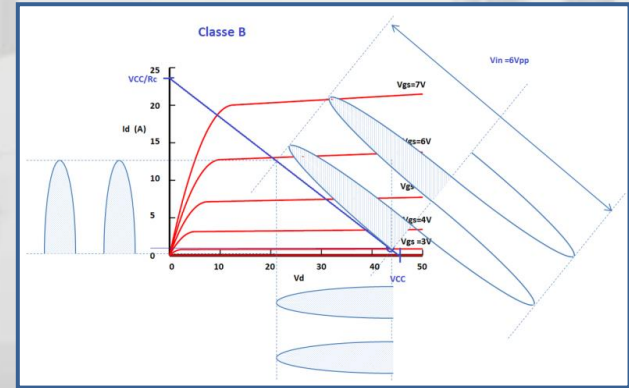
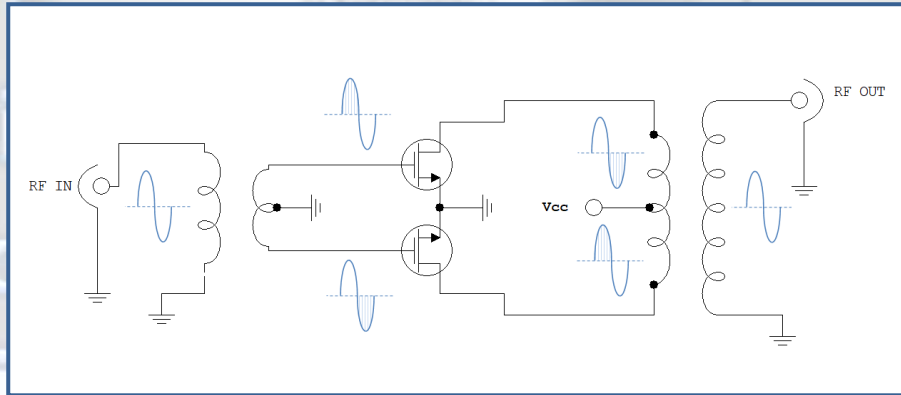
- Tensione di alimentazione bassa (50-60 V)
- Impedenza di uscita molto bassa (5-6 ohm)
- Scarsa capacità di sopportare sovraccarichi termici anche per brevi periodi
- Dimensione e peso ridotti
- Relativa facilità realizzativa dei circuiti
- Costo relativamente basso dei Mosfet (150-200€)
- Configurazione tipica di impiego «*Push-Pull*» in classe B



Elementi fondamentali

Vale la pena ricordare che in una configurazione «Push-Pull» che lavora in classe B in ciascuno dei due dispositivi la corrente di Drain I_D circola alternativamente per solo una semionda (180°) permettendo così ai dispositivi di operare con un rendimento elevato (circa 75%) pur presentando in uscita una forma d'onda indistorta ottenuta dalla somma delle due semionde contrapposte.

Nel caso invece di una configurazione «Single Ended», tipica dei PA a tubi, anche lavorando in classe AB_2 il rendimento è comunque inferiore e la distorsione è maggiore



Elementi fondamentali

Appare quindi evidente come tra le due tecnologie vi siano sostanziali differenze che determinano a sua volta sostanziali differenze nelle caratteristiche e nella tipologia dei circuiti in cui vengono impiegati.

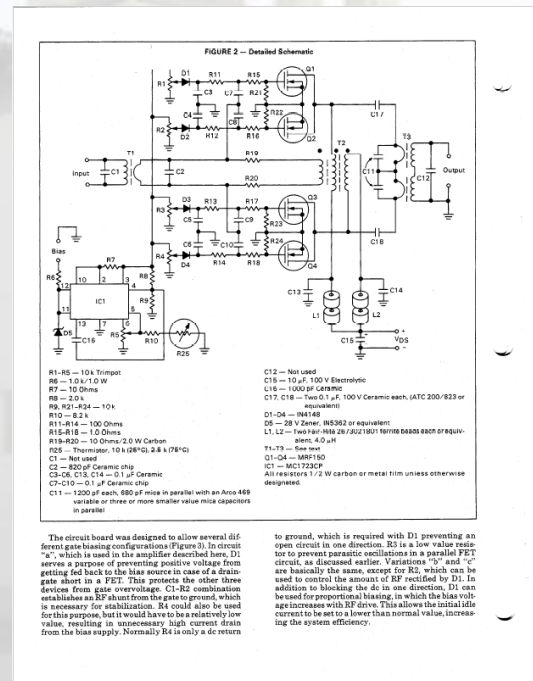
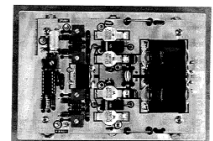


Nei PA che impiegano i tubi le principali problematiche sono riconducibili alle elevate tensioni di utilizzo mentre l'elevato valore di impedenza di carico determina correnti RF relativamente basse che rendono possibile l'utilizzo di reti LC di adattamento di tipo classico come il «pi greco» e dove l'elemento più critico da dover considerare è la tensione di isolamento dei componenti impiegati nei circuiti di uscita.

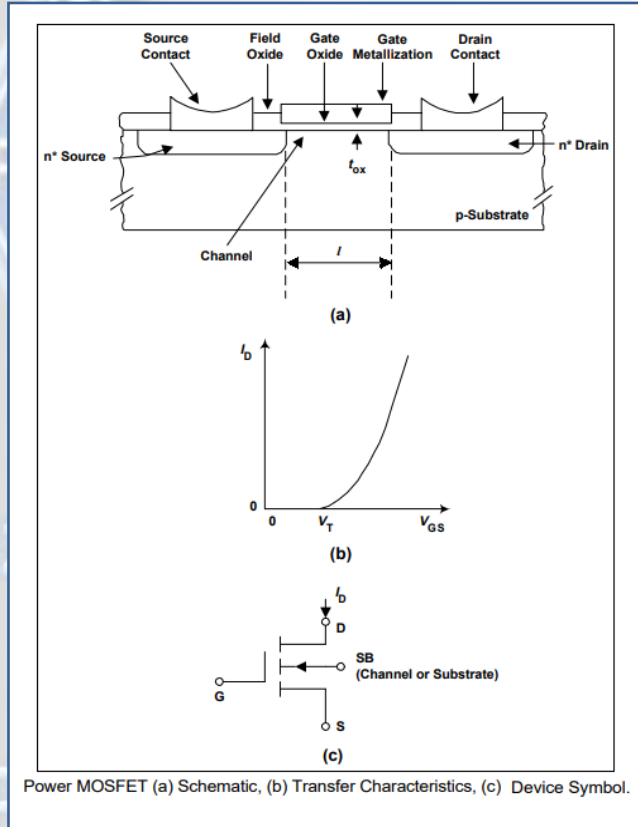


Nel caso di PA che impiegano i MOSFET, a causa della loro impedenza estremamente bassa le correnti RF che percorrono i circuiti di ingresso ma soprattutto quelli di uscita sono molto elevate e quindi le reti di adattamento devono essere progettate secondo criteri diversi ricorrendo quasi esclusivamente a dispositivi di trasformazione a «larga banda» seguiti, in uscita, da filtri LPF per l'eliminazione delle componenti armoniche. Inoltre per le particolari caratteristiche di funzionamento di questi dispositivi è sempre necessaria la presenza di opportuni circuiti di controllo e protezione.

Proviamo adesso a comprendere meglio le caratteristiche e il funzionamento dei MOSFET di potenza.



Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza



Da allora gli sviluppi tecnologici si sono susseguiti rapidamente fino a soppiantare definitivamente, in ambito RF, l'impiego dei tubi per potenze dell'ordine del KW, e fino a frequenze superiori ai 3GHz

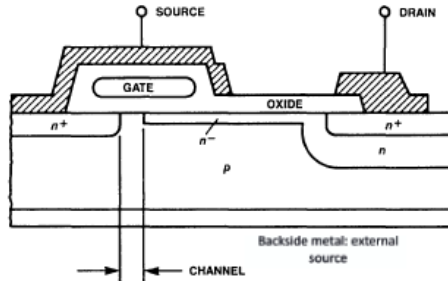
I MOSFET di potenza hanno una struttura diversa dai dispositivi utilizzati in ambito *small-signal* (*depletion-mode Mosfet*) ed in particolare appartengono alla categoria denominata «**enhancement-mode MOSFETs**» in cui la formazione del canale di conduzione è ottenuta dall'azione del campo elettrico dovuto alla tensione di gate nei confronti del substrato.

La particolarità di questa tipologia di MOSFET è data dal fatto che la corrente di drain I_D inizia a circolare solo dopo che la tensione di gate V_{GS} ha raggiunto un valore di soglia (V_{TH} threshold voltage $\approx 3V$) tale per cui si determini l'effetto di «inversione» nel substrato con la formazione del canale

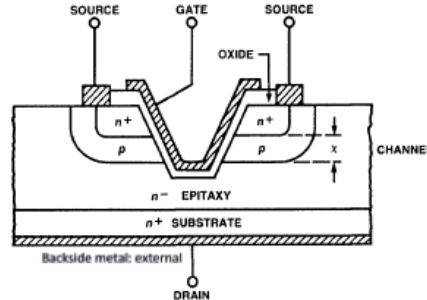
Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

La più recente generazione di MOSFET RF di potenza immessa sul mercato è quella nota come «**High Voltage LDMOS Technology**» (LDMOS Lateral Double-Diffused Enhancement Mode MOSFET).

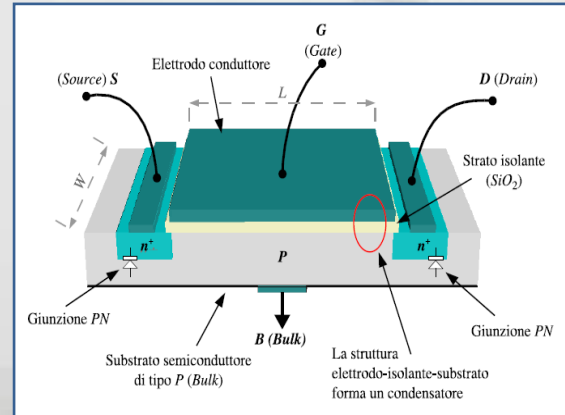
La struttura di questi dispositivi è tale per cui la corrente scorre orizzontalmente rispetto al substrato potendo così realizzare un canale più lungo che permette di avere valori di V_{DS} più elevati e il Drain risulta isolato dal backside che in questa tipologia di Mosfet è connesso al Source rendendone così più semplice l'impiego e la dissipazione di calore rispetto alla tipologia VDMOS in cui il backside è connesso al Drain rendendone quindi necessario l'isolamento elettrico verso il dissipatore.



Cross-Sectional View of Lateral DMOS Structure



V-Groove DMOS

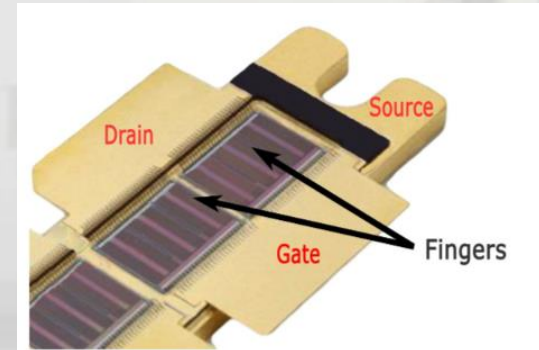
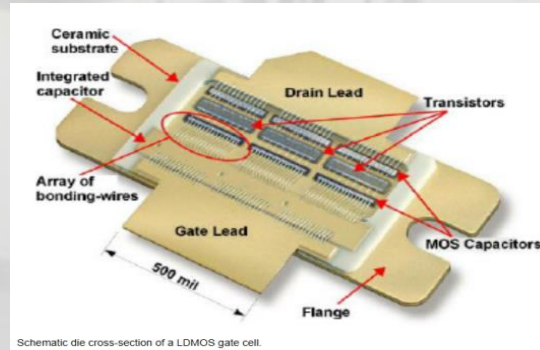


Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Con la tecnologia LDMOS la lunghezza maggiore del canale si traduce nella possibilità di sopportare tensioni V_{DS} più elevate, caratteristica che a sua volta si traduce, a parità di potenza dissipabile, in due significativi vantaggi, impedenza di uscita più alta e minore corrente di Drain con tutto quello che di positivo ne deriva da un punto di vista della dissipazione termica.

Come già visto da un punto di vista termico un secondo importante vantaggio è il fatto che il retro del «wafer», collegato al Source e quindi al backside, *rende possibile il fissaggio meccanico diretto al dissipatore con innegabili vantaggi sulla conducibilità termica*

Per poter gestire elevati livelli di potenza questi dispositivi sono realizzati da un numero elevatissimo di giunzioni singole poste in parallelo (array) e disposte a gruppi (finger)



Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Come già accennato all'inizio le differenze fondamentali tra i tubi e i Mosfet sono sostanzialmente due:

- *Impedenza di uscita molto bassa (valori tipici 2-3 ohm per singolo mosfet)*
- *Scarsa capacità di sopportare sovraccarichi termici anche per brevi periodi*

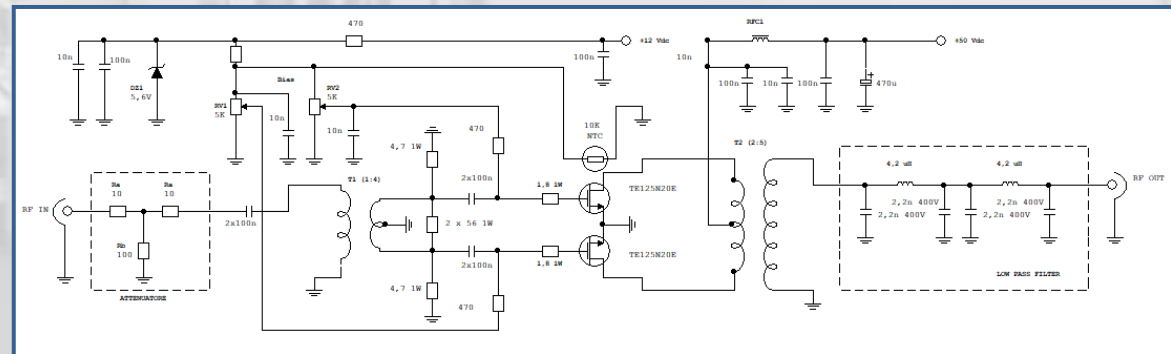
Diretta conseguenza di queste differenze è il fatto che nella progettazione e nell'impiego di amplificatori di potenza RF a Mosfet *si devono utilizzare criteri molto diversi rispetto ai tubi*, vediamo adesso nel dettaglio motivazioni e conseguenze

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Conseguenza diretta del basso valore di impedenza è che le correnti RF che circolano nel circuito di uscita di un amplificatore RF a Mosfet sono estremamente elevate, con una potenza in uscita di 1 KW sul Drain del Mosfet alimentato a 50V avremo correnti RF il cui valore di picco può arrivare a 38A a fronte di un assorbimento sulla linea di alimentazione di 26A ipotizzando un rendimento del 75%.

Con questi valori di corrente (e quindi di impedenza) non è pensabile di poter realizzare circuiti di uscita risonanti commutabili per banda come avviene nel caso dei tubi.

Si deve infatti ricorrere a sistemi di trasformazione a larga banda per innalzare a 50Ω il valore dell'impedenza gestendo il necessario filtraggio delle componenti armoniche dopo la trasformazione di impedenza attraverso l'impiego di adeguati filtri LPF.



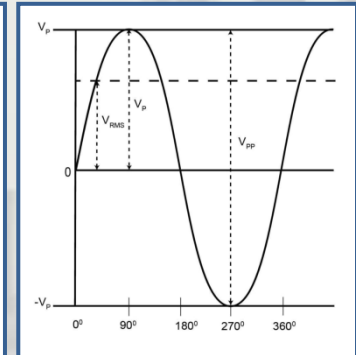
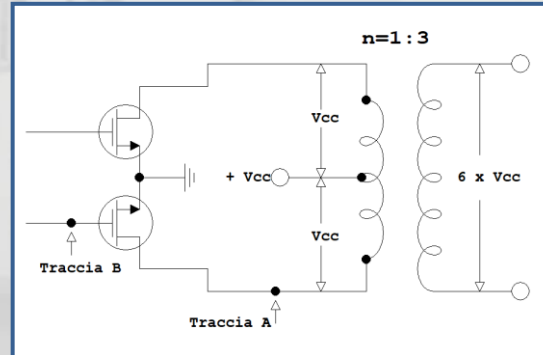
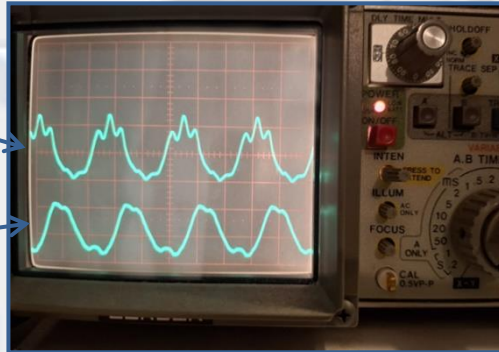
Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Nei PA a Mosfet il basso valore dell'impedenza in uscita è conseguenza diretta della tensione di alimentazione V_{CC} a cui viene fatto lavorare l'amplificatore stesso, valore che a sua volta è vincolato dalla massima tensione di Drain V_{DSS} del Mosfet (nel caso del MRFX1K80H $V_{DSS} = 170V$).

Dobbiamo infatti tenere conto che nel caso di una configurazione «Push-Pull» **la massima tensione V_p che si presenta sui Drain dei due Mosfet è pari al doppio della tensione di alimentazione V_{CC}** valore che può essere anche maggiore in caso di disadattamento o sovrapiilotaggio ed è quindi buona norma mantenere un margine di sicurezza tale per cui **la tensione di alimentazione non deve mai superare 1/3 della V_{DSS}**

Traccia A
50V/Div

Traccia B
5V/Div



Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Impedenza di uscita molto bassa:

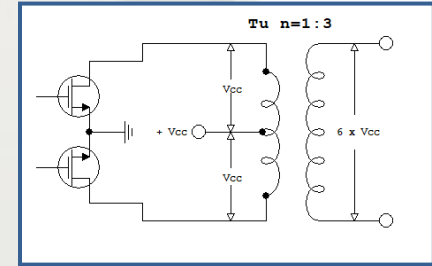
Sempre partendo dal valore della tensione di alimentazione V_{CC} , in funzione del rapporto spire «n» del trasformatore di uscita, è possibile determinare il valore della **massima potenza indistorta** erogabile dal PA così come è possibile determinare il valore dell'impedenza di uscita Z_u visto dai mosfet

Abbiamo già visto come la massima tensione V_p ai capi del primario del trasformatore di uscita sia pari al doppio della tensione di alimentazione V_{CC} di conseguenza sul secondario sarà presente una tensione massima V_L pari a: $V_L = n * V_p = n * 2 * V_{CC}$ che applicata su un carico Z_c di 50Ω determina una potenza pari a:

$$P_{out} = \frac{V_{rms}^2}{Z_c} = \left(\frac{2 n V_{CC}}{\sqrt{2}} \right)^2 / 50 \quad \Rightarrow$$

Sulla base del rapporto spire «n» è anche possibile determinare l'impedenza Z_u «vista» dai Mosfet

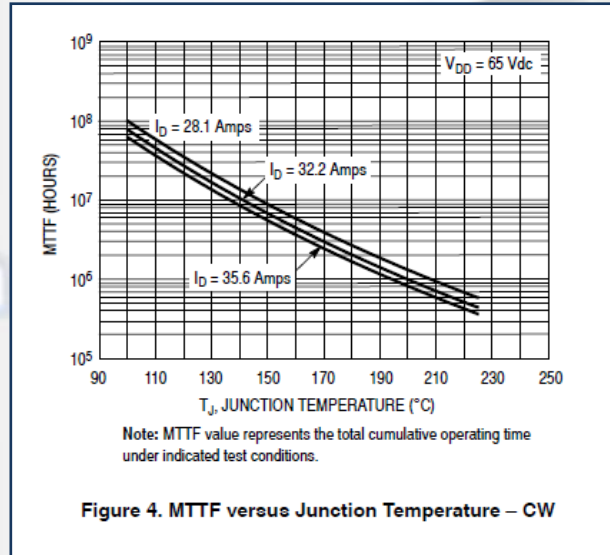
$$Z_u = \frac{50}{n^2} \quad \text{per } n = 3 \quad Z_u = 5,5\Omega$$



nT _{out} = 3	V _{cc}	P _{out} (W)
	(volt)	(max)
	25	208,0
	30	299,5
	35	407,7
	40	532,5
	45	674,0
	50	832,1
	55	1006,8
	60	1198,2

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Gli elevati valori di corrente presenti nel circuito di uscita di un amplificatore di potenza a Mosfet impongono una particolare attenzione nella scelta di adeguata componentistica, con particolare riferimento ai condensatori attraversati dalle correnti RF che *devono avere il più basso valore possibile di ESR* unitamente ad una elevata stabilità termica.

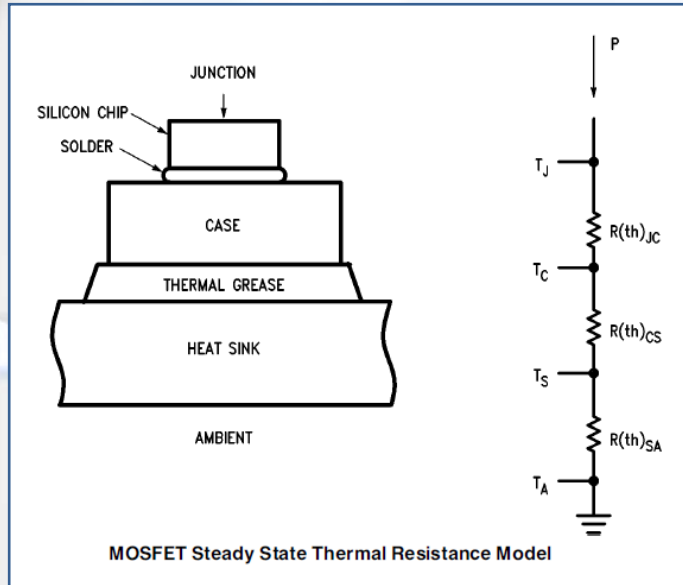


Un secondo aspetto estremamente importante è quello legato alla **dissipazione termica** dei Mosfet. Sebbene i dispositivi di ultima generazione siano notevolmente più robusti che in passato, il problema della dissipazione termica riveste uno dei punti di maggiore criticità.

Il grafico a lato mostra i valori di MTTF (*Mean Time To Failure*) del MRF1K80H in funzione della temperatura raggiunta dalla giunzione durante il funzionamento.

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Si deve infatti considerare con attenzione come per mantenere sufficientemente bassa la temperatura della giunzione non sia sufficiente solo un buon sistema di raffreddamento ma è necessario che l'amplificatore lavori sempre in condizioni di rendimento elevato in relazione alla potenza erogata.



Come è noto, a parità di potenza erogata in uscita, **la potenza dissipata dipende dal rendimento**. Se la potenza dissipata è molto elevata la giunzione può raggiungere temperature elevate anche se l'efficienza del sistema di raffreddamento è molto alta a causa della presenza delle resistenze termiche **$R_{th_{c-s}}$** (resistenza termica tra case e dissipatore) e **$R_{th_{j-c}}$** (resistenza termica tra giunzione e case) .

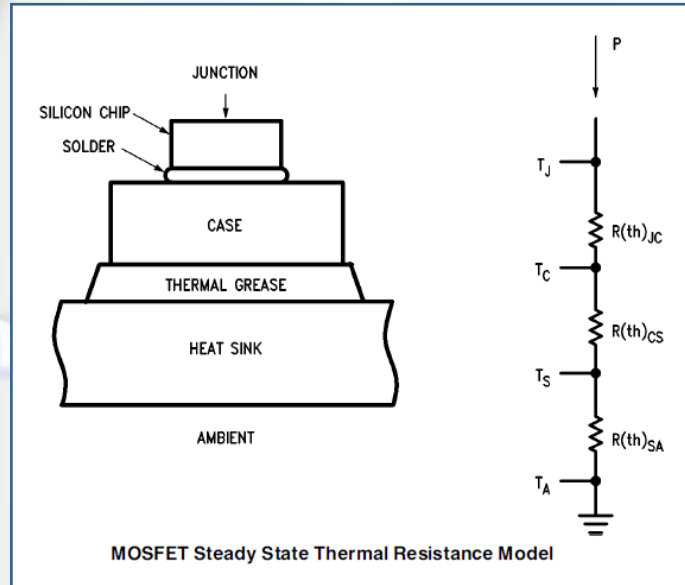
Dobbiamo ricordare che per garantire una «vita tranquilla» ai Mosfet **è bene che la giunzione non superi mai i 150-170°C**

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Proviamo a fare un esempio pratico:

$R_{th_{j-c}}$ (MRFX1K80H) 0,09 °C/W

$R_{th_{c-s}}$ (con pasta termoconduttrice) 0,1 °C/W



Supponendo di lavorare con una potenza dissipata di 500W e di avere un sistema di raffreddamento ottimale con una $R_{th_{s-a}}$ (resistenza termica tra dissipatore e ambiente) estremamente bassa (0,03°C/W), tale da mantenere una temperatura del dissipatore di soli 40°C con una dissipazione di 500W, in queste condizioni la temperatura della giunzione del nostro Mosfet sarebbe comunque pari a:

$$40 + 500 \cdot 0,19 = 135^{\circ}\text{C}$$

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

La potenza che il Mosfet si trova a dover dissipare in calore, a parità di potenza erogata, dipende dal rendimento dell'amplificatore stesso.

A questo proposito è opportuno ricordare che il rendimento di un amplificatore in regime lineare, a parità di condizioni, dipende dall'ampiezza e dall'angolo di circolazione della corrente di Drain ed è interessante notare come il rendimento sia massimo quando ci si approssima alla saturazione.

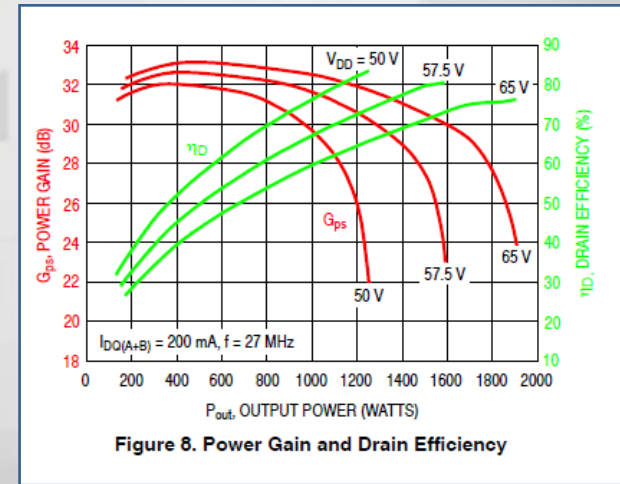
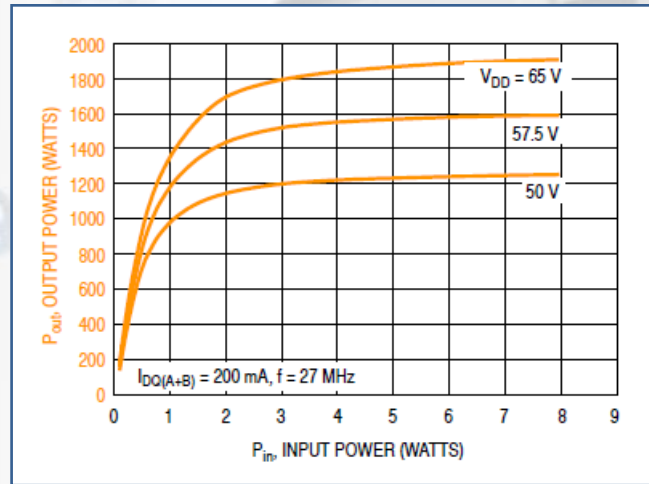


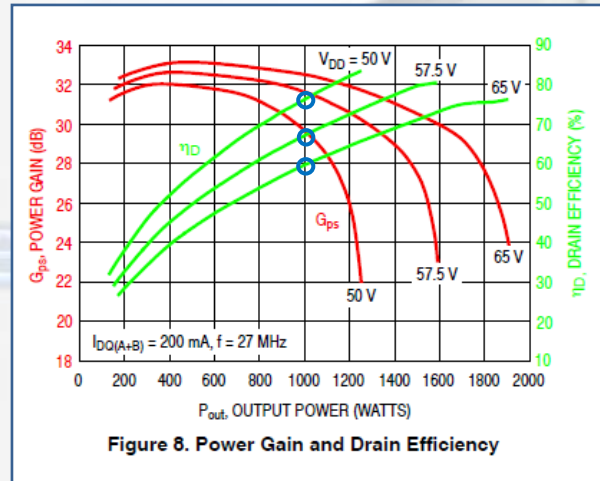
Figure 8. Power Gain and Drain Efficiency

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Proviamo anche in questo caso a fare un esempio pratico:

Consideriamo il caso in cui il PA stia erogando una potenza RF di **1000W**

Dal grafico del rendimento possiamo vedere che in funzione della tensione di alimentazione a cui lavora il Mosfet i valori del rendimento sono diversi e di conseguenza anche la potenza dissipata dal Mosfet in calore sarà diversa:



$$V_{DD} = 65V \quad \eta_D = 60\% \rightarrow P_D = 660W \quad T_J = 165^\circ C$$

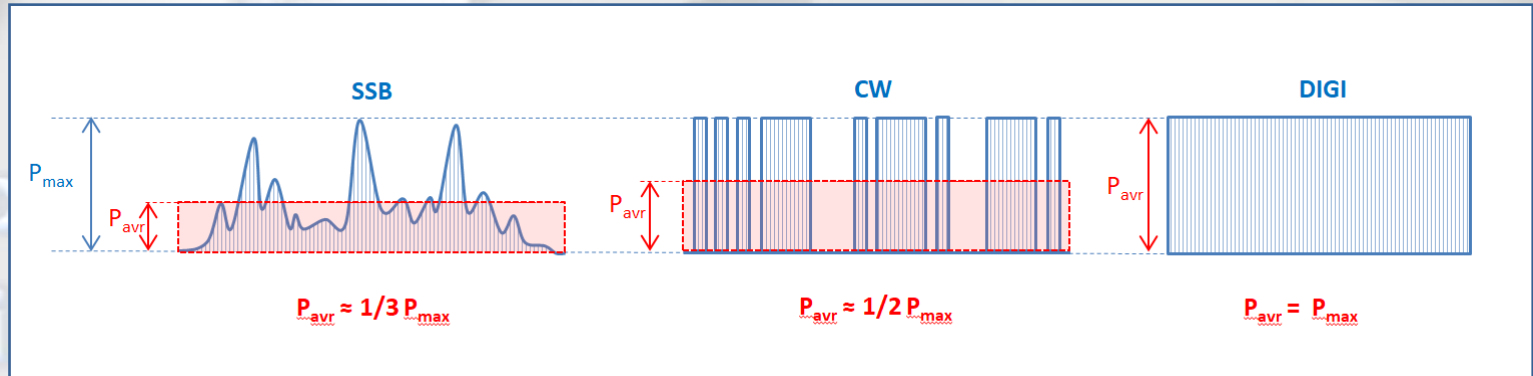
$$V_{DD} = 57,5V \quad \eta_D = 67\% \rightarrow P_D = 490W \quad T_J = 133^\circ C$$

$$V_{DD} = 50V \quad \eta_D = 76\% \rightarrow P_D = 315W \quad T_J = 100^\circ C$$

*E' interessante notare che con la stessa potenza di uscita di 1000W la potenza dissipata in calore varia da **315W** con **V_{DD} = 50V** a **660W** con **V_{DD} = 65V** con le ovvie conseguenze sulla temperatura di giunzione e quindi come abbiamo visto sul MTTF del Mosfet.*

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Nelle valutazioni relative ai livelli di dissipazione dobbiamo poi anche considerare il diverso valore del «Duty Cycle» in funzione delle caratteristiche del segnale, dobbiamo considerare che il livello di potenza media P_{avr} a cui ci dobbiamo riferire nel valutare i livelli di dissipazione è significativamente diverso in funzione della codifica del segnale



Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Quanto abbiamo appena detto relativamente agli aspetti legati alla dissipazione termica e alla temperatura di giunzione, che come abbiamo visto incidono direttamente sulla vita media (MTTF) del Mosfet, hanno quindi una importante ricaduta sulle modalità operative con cui viene impiegato un PA a Mosfet.

Non è un caso infatti che la quasi totalità dei costruttori preveda la possibilità di selezionare la tensione di alimentazione del Mosfet in funzione della potenza in uscita che viene richiesto al PA di erogare.

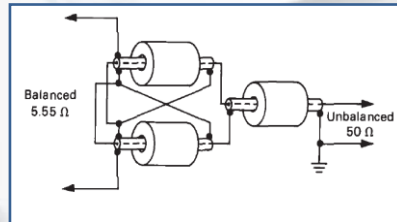
Purtroppo capita spesso che la scarsa conoscenza delle caratteristiche dei Mosfet porti ad utilizzare un PA a stato solido in modalità non corretta convinti invece di fare la cosa giusta.

Far erogare al PA ad una potenza minore della potenza massima erogabile senza ridurre la tensione di alimentazione, pensando così di non sovraccaricare il Mosfet, in realtà produce, come abbiamo visto, l'effetto opposto.

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

C'è poi un altro aspetto importante che ha una significativa ricaduta sul rendimento e quindi per i motivi già visti sul MTTF del Mosfet ed è quello legato al corretto adattamento di impedenza.

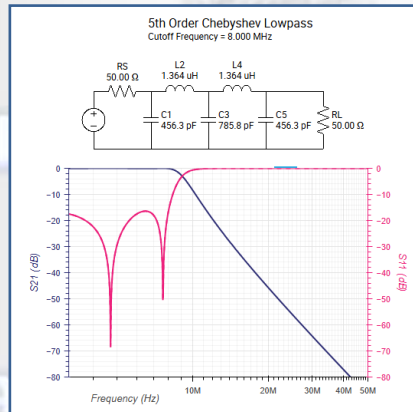
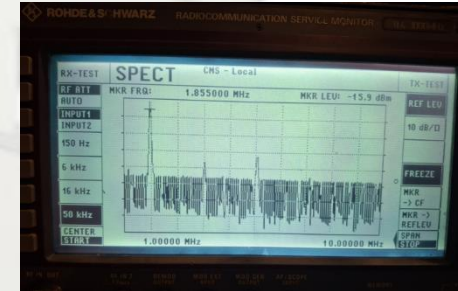
Sebbene i Mosfet di ultima generazione siano in grado di tollerare, molto di più che in passato, valori di SWR elevati, rimane il fatto che in condizioni di disadattamento, anche lieve, il rendimento del PA cala con le conseguenze termiche già viste.



La necessità di coprire un esteso range di frequenza (1,8-50 MHz) unitamente al fatto di non poter utilizzare circuiti di uscita «risonanti» come nel caso dei tubi comporta la necessità di impiegare sistemi di adattamento di impedenza «a larga banda», la soluzione maggiormente utilizzata è l'impiego in uscita di un «TLT» (*Transmission Line Trasformer*) con rapporto di trasformazione 1:9. Come è facile intuire questi dispositivi per quanto ben realizzati hanno curve di risposta non perfettamente lineari su un range di frequenza così esteso

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

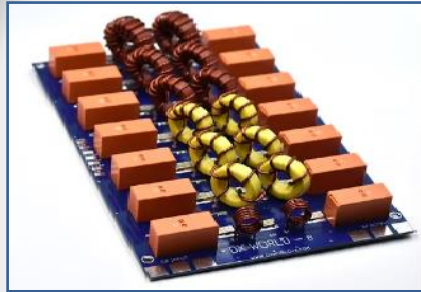
Dobbiamo inoltre tenere conto che per le caratteristiche intrinseche dei Mosfet e per la necessità di farli lavorare in prossimità della saturazione per le ragioni legate al rendimento viste prima, in uscita da un amplificatore a Mosfet l'ampiezza delle componenti armoniche è generalmente più elevata rispetto ai tubi in particolare la 3° armonica è generalmente compresa tra -12 e -15dB rispetto alla fondamentale che comporta la necessità di usare filtri LPF con almeno 30-40dB di attenuazione della 3° armonica



Dalla teoria dei filtri sappiamo che per poter avere i livelli di attenuazione richiesti è necessario impiegare un filtro almeno del 5 ordine per ciascuna banda. Sappiamo anche che le caratteristiche di un filtro di questo tipo, prima fra tutte la sua curva di risposta, dipendono in modo significativo dai valori di impedenza di ingresso e di uscita per il quale è stato calcolato, far lavorare un filtro terminato su valori di impedenza diversi da quelli nominali ne determina un comportamento anomalo che può avere ricadute importanti sul funzionamento del PA.

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Inoltre viste le potenze in gioco dell'ordine di 1000-1500W la componentistica con cui sono realizzati i filtri riveste un ruolo di primaria importanza proprio perché, come abbiamo visto, anche piccole variazioni dei componenti possono produrre variazioni di impedenza che si ripercuotono negativamente sul rendimento del PA con le conseguenze già note.

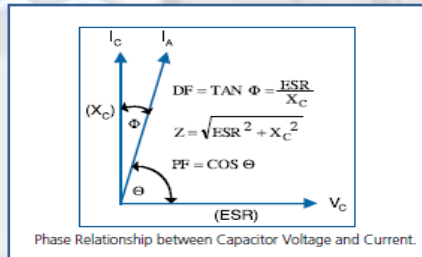


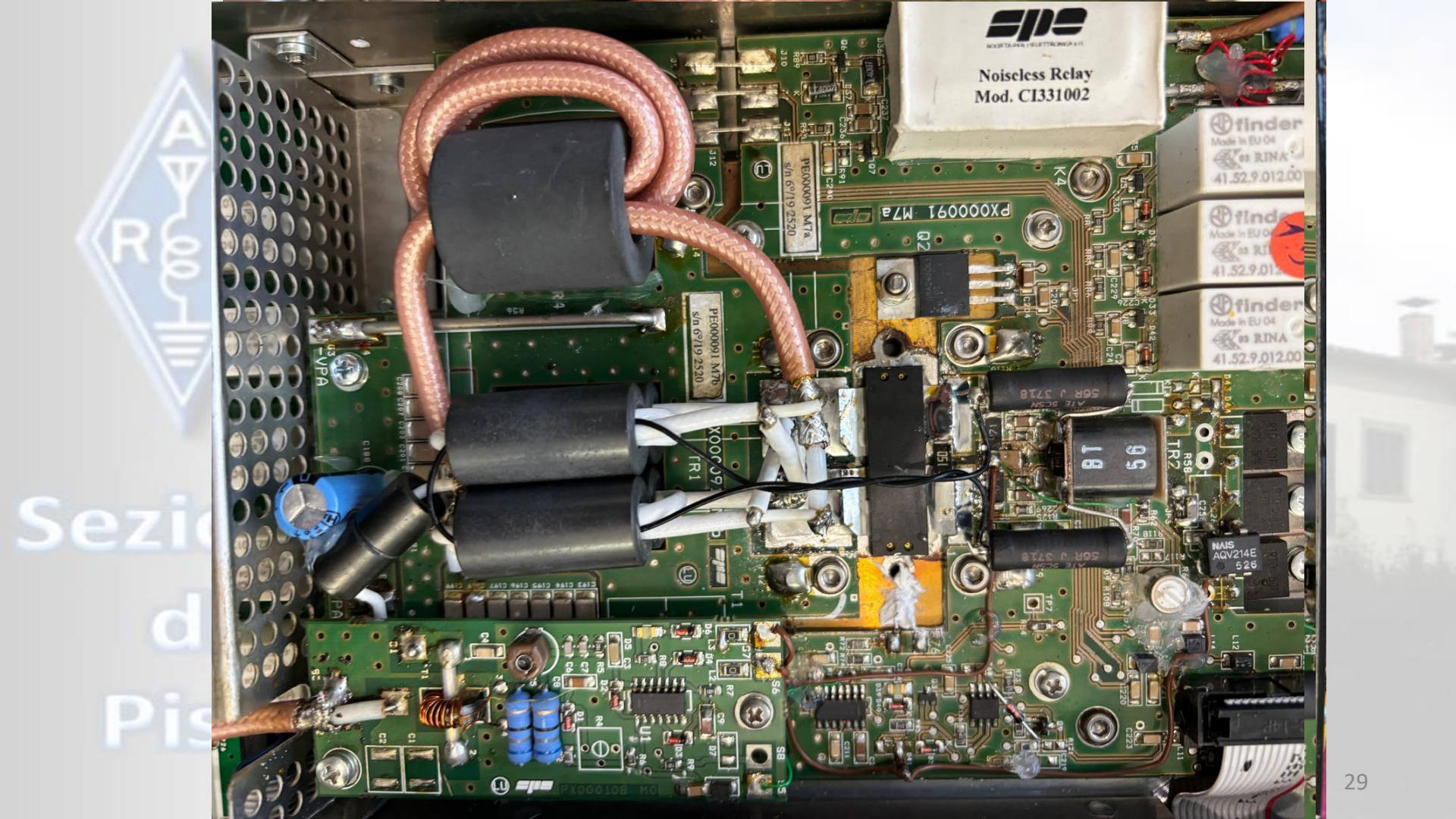
Induttanze e condensatori che costituiscono i filtri LPF devono garantire elevata stabilità termica e livelli di perdite estremamente bassi in quanto le elevate correnti che li percorrono causerebbero dissipazioni non sostenibili.

In particolare i condensatori devono avere ESR (*Equivalent Series Resistance*) estremamente basse ed essere in grado di sopportare elevati valori di corrente RF così come le induttanze e i relativi nuclei toroidali devono essere dimensionati per livelli di induzione opportuni in modo da non determinare variazioni significative dell'induttanza al variare della potenza.

I relè di commutazione devono garantire un adeguato dimensionamento dei contatti.

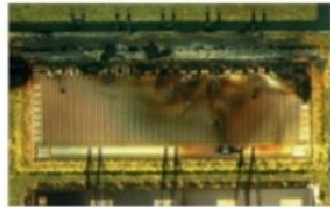
«Tutte caratteristiche che spesso mal si coniugano con le necessità di dimensioni e costo di apparati commerciali.»



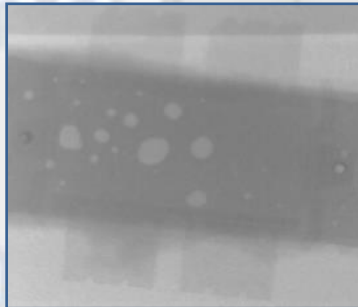


Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Possiamo a questo punto affermare che **il principale «Killer» dei Mosfet è la temperatura di giunzione**, infatti se il mosfet si trova a lavorare con temperature di giunzione troppo elevate ($> 170^{\circ}\text{C}$) può accadere che uno dei tanti dispositivi di cui è costituito vada in fault causando la distruzione del Mosfet



Esempio di guasto termico
a causa di elevata dissipazione



Abbiamo visto quali siano le cause che possono determinare una aumento di dissipazione e il conseguente innalzamento della temperatura di giunzione.

Al netto delle cause è comunque sempre necessario che sia posta una cura particolare al fine di minimizzare le resistenze termiche soprattutto nell'accoppiamento case-dissipatore.

Abbiamo visto all'inizio che esistono due diverse tipologie di «case» 1230 4S e 1230 4L la prima prevede il fissaggio meccanico al dissipatore la seconda prevede la saldatura, sistema che però deve essere utilizzato solo a fronte di attrezzature adeguate in quanto esiste la possibilità che durante il processo di saldatura possano formarsi «bolle» in cui l'adesione non è perfetta vanificando così i vantaggi di tale metodologia.

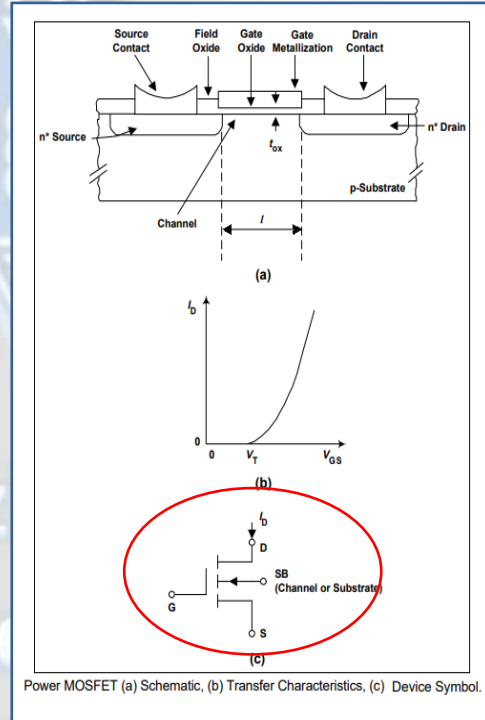
Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Oltre alla temperatura c'è anche un altro aspetto importante a cui si deve porre attenzione, abbiamo già accennato al fatto che un amplificatore a Mosfet per sua natura presenta un contenuto armonico più elevato rispetto ad un tubo, la necessità di lavorare in prossimità della zona di saturazione per i motivi di rendimento già esposti ci espone al rischio di un possibile incremento rapido del livello delle componenti armoniche in caso di disadattamento o sovrapiotaggio.

Questa situazione è potenzialmente molto pericolosa perché oltre al rischio prodotto dall'incremento di temperatura dovuto alla maggiore dissipazione c'è il rischio che si determini una condizione di fault ancora più subdola dovuta a quella che in letteratura tecnica è definita come «**attivazione del transistor bipolare parassita**» (*Latch-up*) che è sempre presente in un mosfet.

Proviamo a descrivere meglio questa condizione

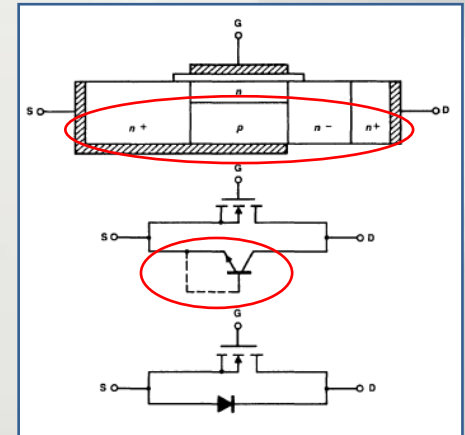
Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza



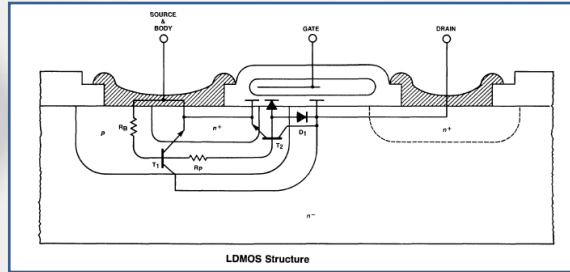
Abbiamo visto all'inizio descrivendo la struttura fisica di un Mosfet come questo in teoria presentasse 4 terminali, sappiamo però che nella pratica i terminali sono solo 3.

Questo accade perché il «substrato» che è composto da una regione di tipo «p» è sempre elettricamente connesso alla regione «n» del «source»

La presenza delle tre regioni n⁺,p,n- con cui è realizzato un Mosfet **di fatto però realizza un transistor NPN (transistor bipolare parassita)** in cui base e emettitore sono però tra loro cortocircuitati dalla connessione del «source» e quindi la giunzione p/n- di fatto si caratterizza come un diodo collegato tra drain e source come peraltro rappresentato nella simbologia e che prende il nome di «Body diode»

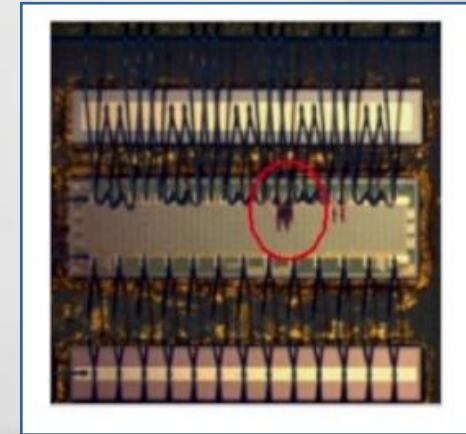


Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza



E' possibile però che in condizioni molto particolari il transistor «parassita» si attivi, condizione che in letteratura tecnica è indicata come «Latch-up» portando di fatto alla distruzione della giunzione e quindi del Mosfet

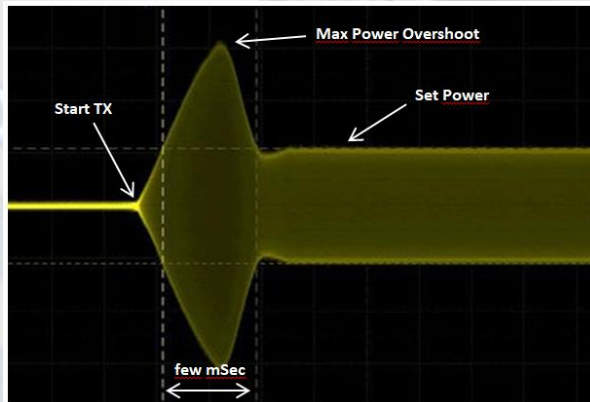
Condizioni anche brevi di forte disadattamento di impedenza, autooscillazioni o contenuti armonici molto elevati delle correnti di drain *possono causare il superamento anche solo istantaneo della tensione di breakdown del diodo D1* causando l'attivazione del transistor parassita e la distruzione del mosfet. In questo caso a differenza di quanto accade per problemi di eccessiva dissipazione solo una piccola zona del dispositivo viene interessata ma causando comunque la distruzione del dispositivo stesso.



Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Vorrei in fine richiamare l'attenzione su un problema troppo spesso sottovalutato ma che è la causa di molti guasti incorsi sia in PA allo stato solido ma in alcuni casi anche in PA che impiegano tubi.

E' il problema causato dai così detti «**Exciter Power Overshoot**» problema che affligge molti apparati quando viene impostato un basso valore della potenza di uscita come spesso accade quando si usa un PA. E' stato riscontrato che in molti casi la catena di controllo del ALC attraverso la quale viene effettuata la regolazione della potenza in uscita dal RTX presenta un ritardo di alcune decine di millisecondi *tempo durante il quale il trasmettitore eroga la massima potenza per scendere poi al valore impostato.*



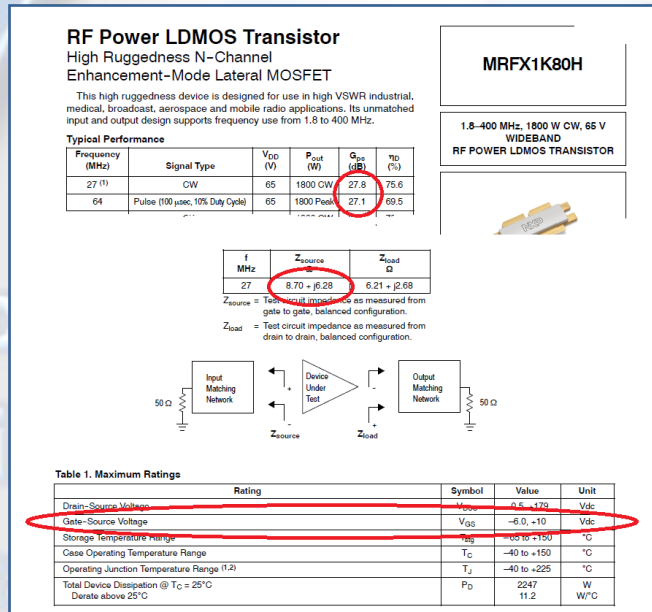
Se il livello di potenza previsto all'ingresso del PA è molto inferiore alla potenza massima erogata dal RTX è possibile che lo «spike» iniziale produca un livello di sovrapilotaggio tale da causare la distruzione del Mosfet e in qualche caso anche di un tubo soprattutto nel caso di tetrodi pilotati di griglia.

La migliore soluzione in questo caso è l'impiego di un attenuatore in ingresso in grado di ridurre la potenza applicata entro i limiti di sicurezza anche se alcuni costruttori prevedono l'uso in ingresso di un circuito di «wave shaping» realizzato con una coppia di diodi zener contrapposti.

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Dobbiamo infatti sempre tenere presente che per l'elevato guadagno di questi dispositivi la potenza in ingresso necessaria ad erogare la massima potenza in uscita è molto bassa.

Infatti il datasheet del MRFX1K80 ci dice che nello spettro 1-30MHz il guadagno del dispositivo è di 27 – 28dB che si traduce in una potenza di pilotaggio di 2-3W per erogare oltre 1500W in uscita.



Sempre dall'analisi dei dati presenti nel datasheet possiamo vedere come l'impedenza di ingresso in configurazione push-pull sia intorno agli 8 ohm e quindi con 3W di pilotaggio la tensione RF sui gate dei mosfet vale circa 5V.

Sempre dall'analisi dei dati riportati nel datasheet del MRFX1K80 possiamo leggere che la massima tensione applicabile ai gate è compresa tra -6V e +10V.

Già dall'esame di questi dati risulta evidente che un elevato sovrapilotaggio potrebbe portare a raggiungere facilmente le tensioni limite ammesse sui gate dei mosfet causandone il fault.

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Per concludere vorrei fare adesso una considerazione che esula dalle argomentazioni tecniche fin qui esposte, mi riferisco a quella che definirei la «*sindrome del pigiabottoni*».

Con l'incremento delle capacità di elaborazione dei microprocessori impiegati nei nostri apparati si tende da una parte a dotare gli apparati stessi di molte funzioni accessorie spesso non proprio necessarie e dall'altra a delegare al processore quei controlli che in passato erano effettuati dall'operatore.

Questa situazione ha introdotto sicuramente molti vantaggi operativi ma ha portato ad «abituarsi» a certi automatismi e a perdere il contatto diretto con il funzionamento degli apparati stessi.

Questo trend ha portato ad introdurre molti automatismi anche nei PA, soprattutto in quelli allo stato solido, ma se da una parte questo ha migliorato il livello di protezione degli apparati stessi, dall'altra a mio avviso ha introdotto due possibili punti di criticità:

- *La possibilità di fault dell'automatismo che cresce esponenzialmente con il moltiplicarsi dei controlli automatici*
- *L'errata percezione indotta nell'operatore di potersi astenere dal controllo preventivo delle corrette condizioni operative.*

Caratteristiche dei MOSFET RF di Potenza

Sulla base di quanto abbiamo visto è possibile quindi affermare che non vi sia una maggiore «fragilità» intrinseca dei PA allo stato solido.

Ma come abbiamo visto le scelte progettuali e la qualità delle realizzazioni è determinante nel garantire un corretto funzionamento di tali dispositivi.

E' necessario però avere sempre ben presente che le condizioni di impiego devono essere rapportate alle caratteristiche di questi dispositivi che se impiegati correttamente possono dimostrare una robustezza paragonabile se non addirittura superiore ai tubi.

Condizioni di impiego che possiamo riassumere in :

- *Massima attenzione ai livelli di dissipazione (rendimento)*
- *Dovendo ridurre la potenza di uscita farlo riducendo anche la tensione di alimentazione*
- *Evitare il sovrapiotaggio causa di incremento del contenuto armonico*
- *Porre attenzione a non impiegare il PA in condizioni di disadattamento di impedenza indipendentemente dalla potenza erogata*
- *Garantire sempre il corretto flusso d'aria necessario al sistema di ventilazione*



Sezione
di
Pisa

Riferimenti:

- *NXP whitepaper - 50V RF LDMOS*
- *Ampleon whitepaper - Extremely Rugged 50 V LDMOS Devices*
- *Ampleon - LDMOS Technology for RF Power Amplifiers*
- *Texas Instruments AN-558 Application Notes - Introduction to Power MOSFETs and Their Applications*
- *NXP AN1955 Application Notes - Thermal Measurement Methodology of RF Power Amplifiers*
- *APT AP0001 Application Notes - High Voltage, High Efficiency MOSFET RF Amplifiers*
- *IR AN1084 Application Notes – Power Mosfet Basics*
- *Siliconix - Rudy Severns - MOSPOWER applications handbook*
- *ATC – RF Ceramic chip capacitors in high RF power application*

I riferimenti citati sono disponibili nella sezione download del sito www.aripisa.it



Sezione
di
Pisa

Grazie





**Sezione
di
Pisa**

Discussione

