

Università degli studi di Roma
“Tor Vergata”



Facoltà di Ingegneria

Master in sistemi di navigazione e comunicazioni satellitari

Switching RF

Antonio D'Ottavio

Sommario

INTRODUZIONE	4
1. PARAMETRI DI PROGETTO PER SWITCH RF.....	5
1.1 Banda	5
1.2 Insertion Loss	5
1.3 Isolamento	5
1.4 P1dB.....	5
1.5 Terminazioni	6
1.6 Velocità di commutazione	6
1.7 Tempo di vita	6
1.8 Dimensioni.....	6
1.9 Tensioni di controllo	6
2. PRINCIPALI TIPOLOGIE DI SWITCH RF.....	7
2.1 Switch in guida d'onda.....	7
2.2 Switch coassiali	7
2.3 Switch a stato solido.....	8
2.3.1 PIN Diode	8
2.3.2 FET	9
2.4 Switch MEMS	12
2.5 Criteri di selezione	13
3. PRINCIPALI SCHEMI DI SWITCH RF	15
3.1 SPST.....	15
3.1.1 Realizzazione con PIN in serie	15
3.1.2 Realizzazione con PIN Shunt.....	15

3.1.3 Realizzazione composita con PIN.....	16
3.1.4 Switch Tuned con PIN.....	17
3.2 SPDT.....	18
3.2.1 Realizzazione con PIN in serie.....	18
3.2.2 Realizzazione con PIN shunt.....	18
3.2.3 Realizzazione composita con FET.....	19
3.3 DPDT o Transfer Switch.....	20
4. REALIZZAZIONE DI UNO SWITCH RF DPDT TUNED.....	21
5. PRINCIPALI APPLICAZIONI DEGLI SWITCHES RF.....	23
5.1 Switch Tx/Rx.....	23
5.2 Selettore di polarizzazione.....	24
5.3 Phase Shifter.....	24
5.3.1 Switched Delay Line.....	24
5.3.2 Switched Filter Phase Shifters.....	25
5.4 Tuning di amplificatori RF.....	27
6. CONCLUSIONI.....	28
LISTA DELLE ABBREVIAZIONI.....	29
BIBLIOGRAFIA.....	30

Introduzione

Gli switches RF hanno assunto sempre maggior importanza negli anni come conseguenza dello sviluppo di sistemi di antenna capaci di modificare dinamicamente il lobo di radiazione, numerose infatti le applicazioni di tali antenne nella telefonia cellulare, in ambito satellitare ed anche nello sviluppo di sistemi radar e nelle wireless lan.

Vi è stato pertanto un forte impulso verso lo sviluppo di switches capaci di ottenere frequenze sempre più alte, consumi di potenza limitati e dimensioni sempre più piccole.

Diverse le tecnologie utilizzate, dai FET, ai PIN, ai MEMS, alcune di queste tecnologie hanno meno di 10 anni di vita ed è già una realtà di mercato, è il caso degli HEMT, altre come i sistemi di commutazione in guida d'onda oppure coassiali, pur essendo sul mercato da più di 50 anni sono ancora la miglior scelta progettuale in numerose applicazioni.

Nel seguito verrà quindi svolta una panoramica sui possibili dispositivi utilizzabili nella realizzazione di switches sia meccanici che a stato solido, come pure verranno individuati i principali schemi di implementazione per switches SPST, SPDT e DPDT.

Si passerà quindi alla descrizione del progetto di un Transfer Switch realizzato con pHEMT e con frequenza operativa da 0 a 20GHz.

Per concludere verranno esemplificate alcune possibili applicazioni di Switches RF.

1. Parametri di progetto per switch RF

1.1 Banda

L'intervallo di frequenze nel quale lo switch può operare correttamente è un parametro importante perché vi sono dispositivi come i diodi PIN i quali possono trattare frequenze di centinaia di GHz ma non sono utilizzabili per le basse frequenze, si riesce infatti al minimo a trattare segnali di alcuni MHz e con speciali accorgimenti sulle dimensioni del dispositivo.

1.2 Insertion Loss

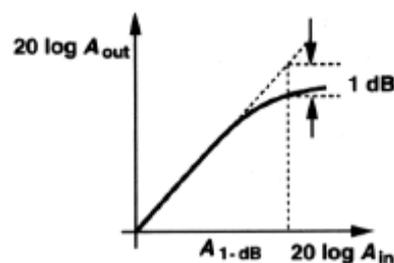
Considerando lo switch nello stato ON, la perdita di inserzione è pari alla differenza di potenza in dB tra l'ingresso e l'uscita dello stesso, è quindi una misura di quanto effettivamente lo switch sia trasparente quando attivo, lo switch ideale presenta Insertion Loss nulla.

1.3 Isolamento

Considerando lo switch nello stato OFF, l'isolamento è pari alla differenza di potenza in dB tra l'ingresso e l'uscita dello stesso, è quindi una misura di quanto effettivamente riesce a separare in potenza l'ingresso dall'uscita.

1.4 P1dB

Individua la massima potenza che può essere controllata dallo switch RF senza introdurre compressione la quale come per gli amplificatori viene espressa dal punto di compressione ad 1dB illustrato nella seguente figura:



1.5 Terminazioni

Vi sono switch in cui il ramo OFF non deve presentare una alta impedenza bensì una terminazione a 50Ω .

1.6 Velocità di commutazione

E' il tempo impiegato dallo switch per passare dallo stato ON allo stato OFF oppure viceversa.

1.7 Tempo di vita

I dispositivi a stato solido non hanno problemi in termini di numero di commutazioni che lo switch può assicurare prima di rompersi mentre per sistemi elettromeccanici e per i MEMS è da considerare anche questo parametro.

1.8 Dimensioni

In termini di isolamento e Insertion Loss le prestazioni migliori si hanno con switch coassiali e guide d'onda che sono sistemi elettromeccanici di commutazione tuttavia le loro dimensioni sono proibitive per molte applicazioni come nel caso di sistemi spaziali dove le dimensioni si traducono pesantemente in costi.

1.9 Tensioni di controllo

A seconda del dispositivo utilizzato si richiede un diverso circuito di controllo, in particolare i diodi PIN richiedono una alimentazione in corrente continua pari a circa 10mA mentre i MESFET richiedono almeno una tensione negativa continua.

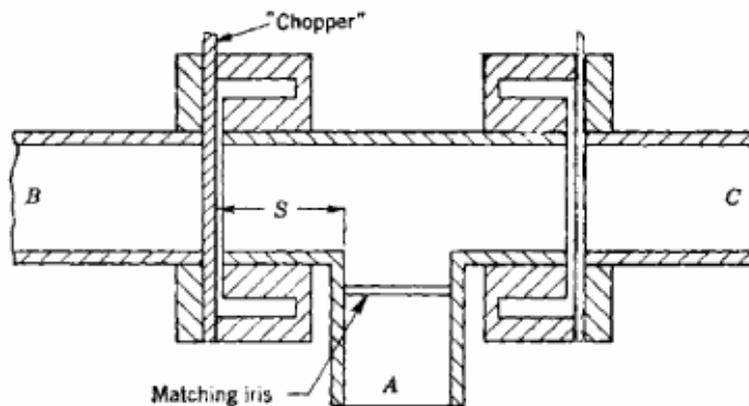
Anche alcuni sistemi MEMS richiedono una tensione elevata mentre guide d'onda e sistemi coassiali possono effettuare la commutazione sia manualmente che tramite sistemi elettromeccanici nel qual caso gli assorbimenti sono elevati.

2. Principali tipologie di switch RF

Questo capitolo descrive i principali dispositivi utilizzati per realizzare sistemi di commutazione a radiofrequenza, vi sono sia soluzioni molto datate come gli switches in guida d'onda o coassiali come pure soluzioni innovative quali i MEMS.

2.1 Switch in guida d'onda

Uno switch in guida d'onda si può realizzare con una giunzione a T dove A è l'ingresso mentre B e C sono le due uscite dove ci sono i carichi, nel caso si voglia inviare il segnale verso il carico in C viene messa meccanicamente una lamina che cortocircuita la guida all'uscita B.

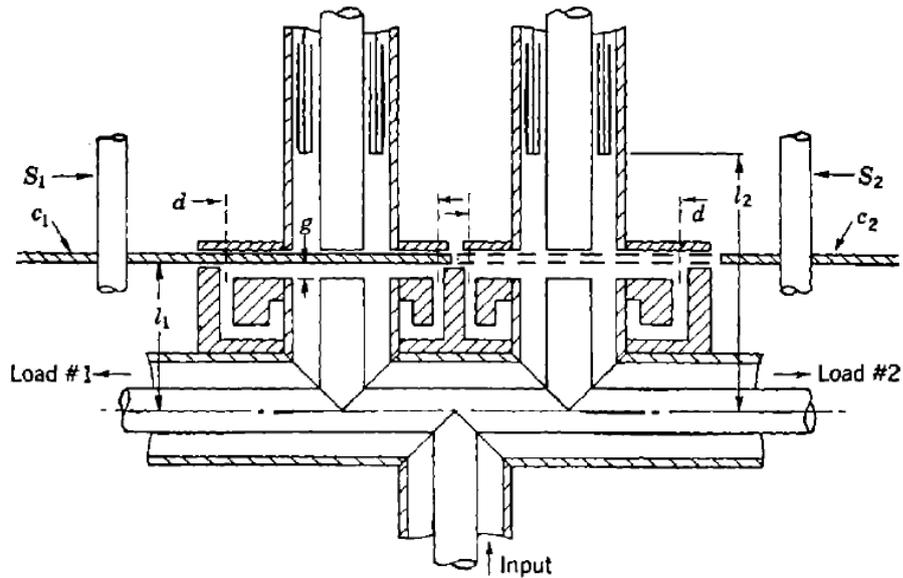


Analogamente per inviare il segnale all'uscita B viene cortocircuitata l'uscita C. La posizione dei cortocircuiti congiuntamente all'utilizzo dell'iride, una lamina metallica con un foro centrale, consentono l'adattamento di impedenza.

Uno switch in guida d'onda consente di ottenere almeno 60dB di isolamento e 0.1dB di Insertion Loss su tutta la banda operativa della guida d'onda.

2.2 Switch coassiali

Sono switches che possono essere commutati manualmente oppure tramite sistemi elettromeccanici, un esempio di realizzazione è presente nella seguente figura:



Il funzionamento di questo switch prevede che il segnale proveniente dall'ingresso in basso sia convogliato verso l'uscita 1 oppure l'uscita 2 a seconda delle lunghezze l_1 ed l_2 dei due stub in alto, in particolare esse sono variate mediante i dischi metallici c_1 e c_2 montati su dei supporti ruotanti in sincronia, S_1 ed S_2 .

Nel caso in figura l'ingresso viene convogliato verso l'uscita 1 infatti il disco c_1 fissa la lunghezza dello stub di sinistra a un quarto di lunghezza d'onda e quindi consente al segnale in ingresso di esser trasferito al carico 1 mentre essendo il disco c_2 completamente estratto allora lo stub di destra è lungo mezza lunghezza d'onda e quindi cortocircuita il carico 2.

Si riescono ad ottenere buone prestazioni sino a 40GHz, l'isolamento è di oltre 60dB mentre l'Insertion Loss è di decimi di dB, i fattori negativi riguardano i tempi di commutazione che sono dell'ordine delle decine di millisecondi e le dimensioni elevate che sono stretta conseguenza della struttura fisica.

2.3 Switch a stato solido

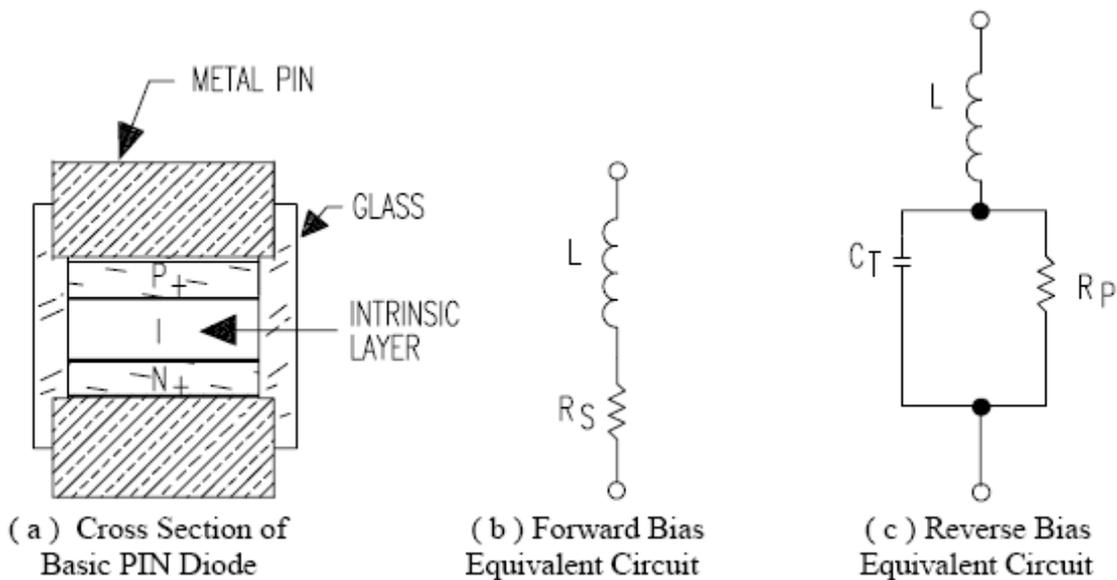
I dispositivi a stato solido hanno indubbi vantaggi in termini di dimensioni e prestazioni ripetibili nel tempo, ne sono inoltre disponibili diverse varietà che coprono le varie esigenze di potenza e di frequenza.

2.3.1 PIN Diode

Un diodo PIN è un diodo nel quale tra la regione P e la regione N è inserita una regione di semiconduttore intrinseco ossia non drogato, almeno idealmente, a questa regione deve la proprietà di comportarsi alle alte frequenze come una resistenza intendendo per alte frequenze

delle frequenze superiori a $f_0 = \frac{1}{2\pi\tau}$ dove τ è il tempo di ricombinazione dei portatori minoritari nella regione intrinseca.

Per frequenze inferiori ad f_0 il PIN si comporta come un normale diodo mentre per frequenze superiori si ha un comportamento diverso a seconda di come è polarizzato, in particolare nel caso di polarizzazione diretta il diodo come detto si comporta come una resistenza, l'induttanza in serie modella i terminali del dispositivo, nel caso invece di polarizzazione inversa la regione intrinseca viene svuotata e pertanto il diodo si comporta a tutti gli effetti come una capacità, la resistenza in parallelo è dovuta alla non idealità della regione intrinseca dove rimangono comunque dei portatori.



Nel comportamento switching del PIN si ha che la regione intrinseca si riempie istantaneamente di portatori nel passaggio da polarizzazione inversa a polarizzazione diretta mentre nel passaggio inverso occorre attendere il tempo di diffusione delle cariche.

I vantaggi dell'utilizzo di diodi PIN per applicazioni di commutazione sono l'ottima linearità, il fatto che possono essere utilizzati sino a frequenze molto alte come pure la possibilità di controllare potenze di segnale molto elevate con correnti di polarizzazione di decine di mA.

2.3.2 FET

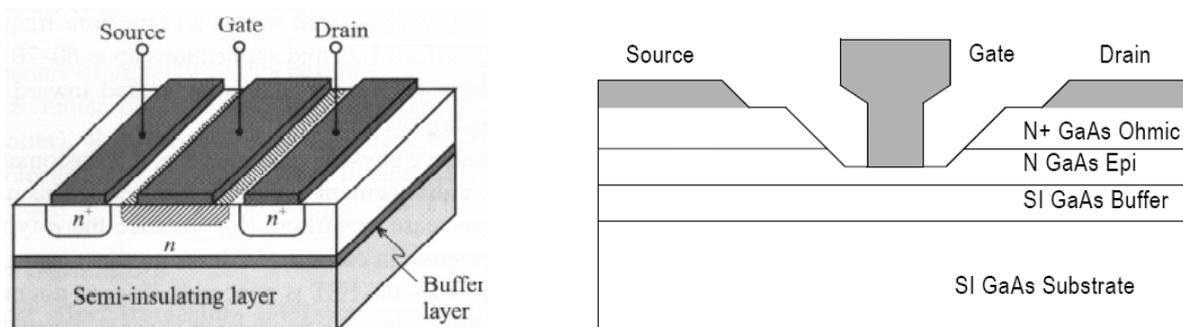
Nella categoria FET vengono inclusi i MESFET, gli HEMT ed i MOSFET, sono tutte varianti del transistor ad effetto di campo JFET il quale è stato abbandonato per le sue prestazioni deludenti o per meglio dire è stato migliorato dando vita a questi nuovi dispositivi che si distinguono tra loro per le diverse frequenze operative, la potenza, la rumorosità e le dimensioni.

Nel seguito vengono brevemente descritte le caratteristiche di questi FETs che in particolari configurazioni possono essere utilizzati nella realizzazione di switch a stato solido.

2.3.2.1 GaAs MESFET

Il nome MESFET stà per Metallo-Semiconduttore FET, in esso la giunzione Gate-canale di tipo PN dei JFET viene sostituita con una giunzione Schottky metallo-semiconduttore, ciò consente di realizzare dei Gate più piccoli minimizzando pertanto la capacità Gate-canale ed i tempi di attraversamento del canale stesso.

Il canale attivo viene realizzato nello strato epitassiale drogato N accresciuto su un substrato di GaAs, in questo modo si riescono a controllare con precisione le dimensioni del canale stesso, inoltre la presenza dello strato Buffer consente di evitare che impurità e imperfezioni nel cristallo del substrato influenzino le prestazioni del canale.



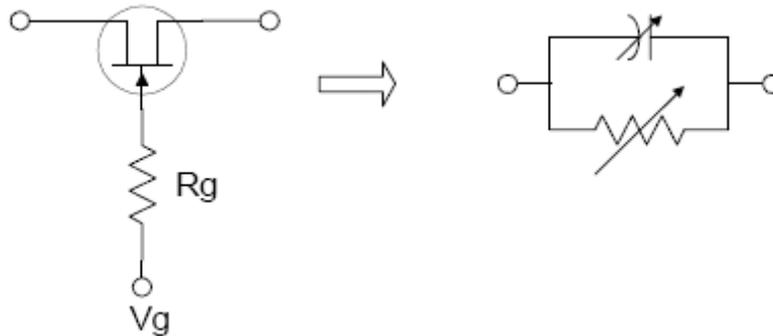
Gli strati di semiconduttore drogati pesantemente N+ e sottostanti il Source ed il Drain realizzano dei contatti ohmici, ossia contatti resistivi che consentono il flusso di corrente in entrambe i versi, al contrario di quanto accade nel Gate dove si ha la giunzione Schottky.

Da questi accorgimenti deriva un miglioramento delle prestazioni rispetto al JFET che consente al MESFET di operare sino a diverse decine di GHz, inoltre il substrato in GaAs, oltre a offrire una mobilità degli elettroni superiore a quella del silicio, consente di realizzare in prossimità del dispositivo dei buoni elementi reattivi indispensabili nella realizzazione delle reti di adattamento che in alta frequenza sono necessarie.

Per il comportamento switching del MESFET occorre considerare il caso in cui consente il trasferimento di segnale da Source a Drain comportandosi come una resistenza il cui valore è funzione della tensione applicata al Gate ed il caso invece in cui non avviene trasferimento di segnale da Source a Drain.

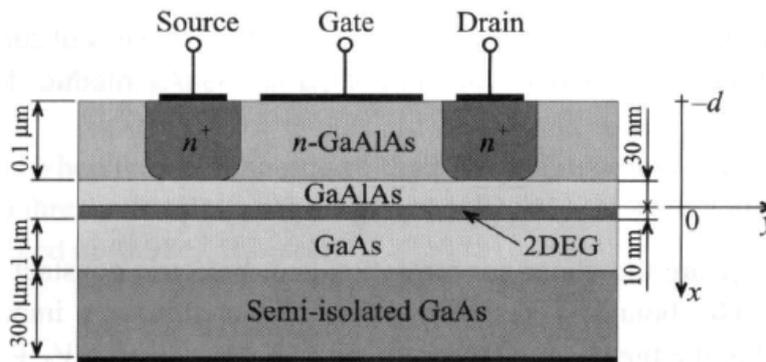
Applicando una tensione nulla al Gate si ha che il canale sottostante è formato e la corrente che vi scorre è proporzionale alla tensione applicata tra Source e Drain, il comportamento può essere pertanto modellizzato con una resistenza, se invece si applica al Gate una tensione negativa, solitamente di -5V, si ottiene che il canale sottostante viene

completamente svuotato di portatori, condizione di Pinch-Off, e pertanto non scorre corrente tra Source e Drain se non una corrente di perdita nel substrato modellata con una capacità.



2.3.2.2 HEMT

L'HEMT, High Electron Mobility Transistor differenzia dal MESFET per il fatto che il canale è formato da una eterogiunzione, ossia una giunzione tra semiconduttori con differente band-gap, invece che da uno strato epitassiale, tale eterogiunzione realizza un canale non drogato il quanto consente una mobilità degli elettroni maggiore rispetto al MESFET.

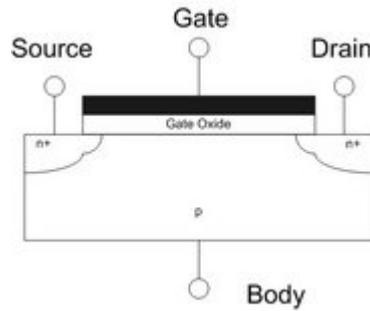


Il dispositivo presenta un elevato guadagno ed è capace di operare sino a frequenze di 200GHz, il principale svantaggio risiede nella difficoltà ad operare con potenze molto elevate e nei costi ancora elevati.

Un'ulteriore variante sono i pHEMT o HEMT pseudomorfici nei quali viene aggiunto uno strato di InGaAs tra GaAs e GaAlAs ottenendo così un incremento della frequenza operativa rispetto agli HEMT.

2.3.2.3 MOSFET

Nel MOSFET, Metallo-Ossido-Semiconduttore FET, invece della giunzione polarizzata inversamente del JFET si ha un condensatore costituito da uno strato isolante di biossido di silicio, SiO₂, interposto tra il polisilicio connesso al terminale di Gate ed il substrato. Applicando una tensione positiva al Gate vengono attratti gli elettroni che sono portatori minoritari nel substrato sottostante, si viene così a creare un canale di inversione che consente il flusso di corrente tra Source e Drain, il suo valore è funzione della tensione applicata al Gate.



Per il comportamento switching del MOSFET interessano due regioni di funzionamento:

- Regione di interdizione, si ha $I_{DS} = 0$ per $V_{GS} < V_t$

$$I_{DS} = \beta \left[(V_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

- Regione di triodo, si ha per $0 < V_{DS} < V_{GS} - V_t$

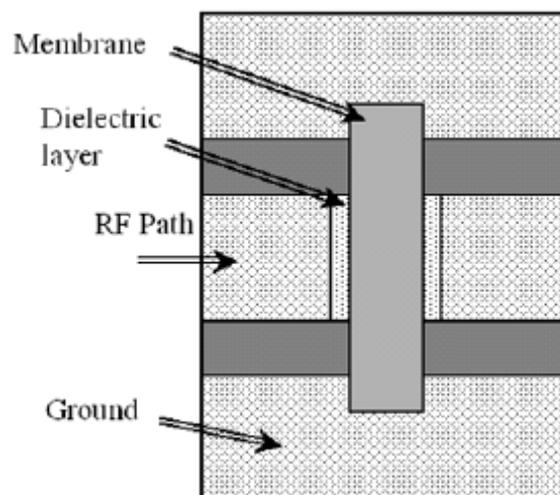
dove V_t è la tensione di soglia per la quale si viene a costituire il canale nel substrato.

2.4 Switch MEMS

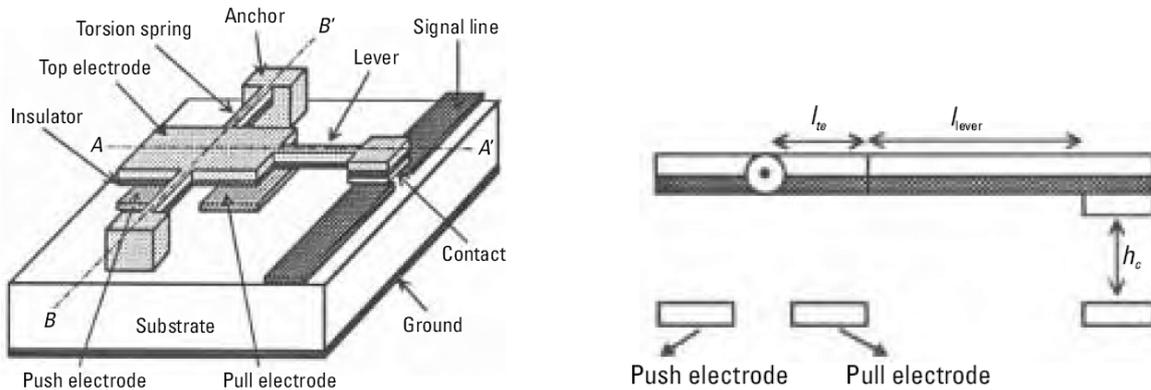
Sono possibili diverse realizzazioni di switch RF in tecnologia MEMS, tutte hanno ottime prestazioni in termini di isolamento nello stato OFF e di Insertion Loss nello stato ON.

Nella pratica si ottiene uno switch con le caratteristiche di uno switch elettromeccanico ma con dimensioni talmente piccole da potersi considerare un dispositivo allo stato solido così come i diodi PIN ed i MOSFET.

Nel seguito viene mostrato uno switch MEMS capacitivo, esso è costituito da un elettrodo con sopra uno strato dielettrico e ancora sopra una membrana metallica fissata alla massa alle due estremità.



In assenza di potenziale applicato all'elettrodo sottostante si ha che la membrana è sospesa e separata da aria rispetto al conduttore centrale della linea coplanare, applicando invece un campo elettrostatico all'elettrodo si ha che la membrana viene attratta verso di esso e si crea un percorso a bassa impedenza verso massa per il segnale a radiofrequenza. Si tratta di una configurazione shunt mentre nello schema seguente è mostrata una configurazione serie detta push pull in quanto vi sono due elettrodi, quando se ne attiva uno si alza il lever mentre quando si attiva l'altro il lever si abbassa sulla linea di segnale.



2.5 Criteri di selezione

In termini di isolamento e Insertion Loss le prestazioni migliori si ottengono con switch coassiali e guide d'onda elettromeccaniche, tali sistemi infatti presentano Insertion Loss di alcuni decimi di dB e isolamenti che possono arrivare sino a 100dB a frequenze di 20GHz, inoltre possono pilotare anche segnali con potenze sino a centinaia di KWatt al contrario di quanto avviene nei dispositivi a stato solido dove il valore massimo è spesso di 20dBm. I principali svantaggi sono invece le ingombranti dimensioni ed il fatto che impurità e corrosione degradano le prestazioni nel tempo di questi dispositivi elettromeccanici, oltre ciò essi possono supportare sino ad un massimo di 10 milioni di cicli di commutazione mentre per i dispositivi a stato solido il numero dei cicli supportabili è teoricamente infinito. Come regola generale si utilizzano switch in guida d'onda o switch coassiali per applicazioni in alta potenza che richiedono bassa distorsione, banda molto ampia e non necessitano di velocità di commutazione elevate.

Tra i dispositivi a stato solido abbiamo che i diodi PIN sono in grado di sopportare le maggiori potenze di segnale applicate tuttavia essi essendo dispositivi a due terminali richiedono circuiti di polarizzazione abbastanza complessi in quanto debbono separare la polarizzazione in continua dal segnale a radiofrequenza.

La necessità di una corrente di alcune decine di mA è uno svantaggio per i PIN rispetto ai MESFET in quanto in sistemi come antenne ad array fasato possono essere necessari milioni di switches e quindi se realizzati con PIN si ha un forte assorbimento.

Tra gli altri vantaggi dei MESFET si ha il fatto che rispetto ai PIN il circuito di polarizzazione è molto semplice e si riescono ad ottenere sia una banda maggiore che maggiori velocità di commutazione, inoltre i PIN hanno una limitazione inferiore nel funzionamento in frequenza infatti possono trattare soltanto segnali con frequenza maggiore di alcuni MHz.

La seguente tabella confronta le caratteristiche dei MESFET con quelle dei PIN:

	1 micron MESFET	PIN al Silicio	PIN GaAs
Numero di terminali	3	2	2
Resistenza ON	1.5 Ω /mm	1.7 Ω /mm	1.7 Ω /mm
Capacità OFF	0.4 pF/mm	0.05 pF/mm	0.05 pF/mm
Tensione di rottura	15 volt	50 volt	30 volt
Limite di frequenza inferiore	DC	10 MHz	10 MHz
Complessità circuito bias	bassa	alta	Alta
Caratteristiche circuito bias	0v ON -5v OFF	10 mA ON Da 0v a -30v OFF	10 mA ON Da 0v a -30v OFF

Ulteriori miglioramenti in frequenza e rumorosità si ottengono con gli HEMT i quali possono raggiungere frequenze anche di 200GHz, si tratta tuttavia di una tecnologia ancora molto complessa e costosa.

MOSFET e MESFET su GaAs sono comparabili soltanto sino a frequenze di circa 3GHz, tuttavia i MOSFET presentano il grande vantaggio di essere facilmente integrabili, avere costi molto ridotti ed inoltre non necessitano di tarature nel corso del processo di produzione.

Gli switch RF MEMS trovano applicazione sino a oltre 120GHz specialmente in antenne ad array fasato, il principale problema riguarda l'affidabilità a breve e lungo termine.

3. Principali schemi di switch RF

In questo capitolo verranno mostrati i principali schemi di switch RF, ossia SPST, SPDT e DPDT, molto diffusi nei sistemi d'antenna sono anche topologie più complesse le quali comunque risultano solitamente essere estensioni degli schemi mostrati in questa sezione.

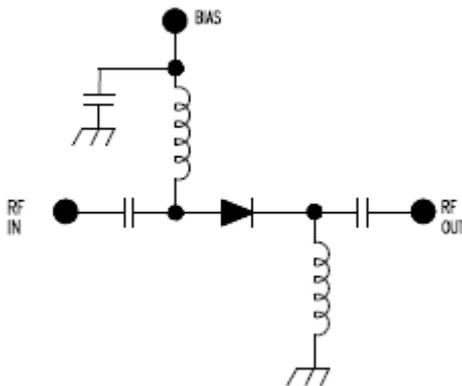
3.1 SPST

La funzione eseguita da uno switch SPST è molto semplice, esso può essere nello stato ON e lasciare passare il segnale RF dalla porta d'ingresso verso la porta d'uscita oppure può trovarsi nello stato OFF ed impedire pertanto al segnale d'ingresso di raggiungere l'uscita.



3.1.1 Realizzazione con PIN in serie

E' una configurazione che consente di avere una Insertion Loss minima su un range di frequenze molto ampio, ciò in quanto l'Insertion Loss considera lo switch ON e quindi il PIN polarizzato direttamente, esso si comporta quindi come una resistenza, il cui valore è settato dalla corrente di polarizzazione, sino a frequenze di centinaia di GHz.

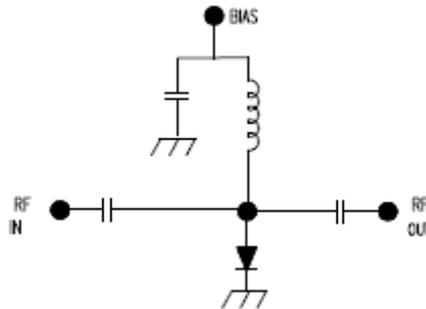


Nel circuito i due condensatori impediscono che la continua di alimentazione del diodo raggiunga il carico o il generatore mentre le due induttanze sono un corto per la continua ma presentano una alta impedenza per il segnale RF che pertanto non viene cortocircuitato a massa.

3.1.2 Realizzazione con PIN Shunt

Questa configurazione si caratterizza per un elevato l'isolamento su un range di frequenze molto esteso, infatti in questo caso lo switch è OFF se il PIN è polarizzato

direttamente e quindi cortocircuita il carico. L'Insertion Loss è bassa in quanto non ci sono elementi in serie lungo la linea, inoltre lo schema consente di controllare potenze di segnale elevate in quanto un terminale del PIN è a massa e quindi può essere connesso a delle alette di raffreddamento.

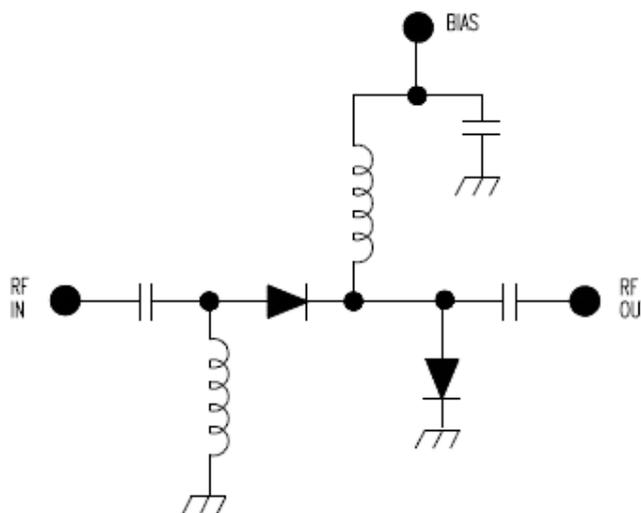


3.1.3 Realizzazione composita con PIN

Al fine di ottenere isolamenti maggiori di 40dB occorre utilizzare delle combinazioni serie-parallelo come pure strutture risonanti, ciò è dovuto al fatto che la capacità parassita, che modella il PIN polarizzato inversamente, consente comunque il passaggio del segnale RF.

3.1.3.1 Configurazione a L

In questa disposizione si ha che lo switch è ON quando il PIN serie è polarizzato direttamente ed il PIN shunt è polarizzato inversamente, viceversa nel caso lo switch è OFF, l'isolamento aumenta in quanto oltre ad esservi la capacità del PIN serie c'è anche la resistenza verso massa espressa dal PIN shunt.

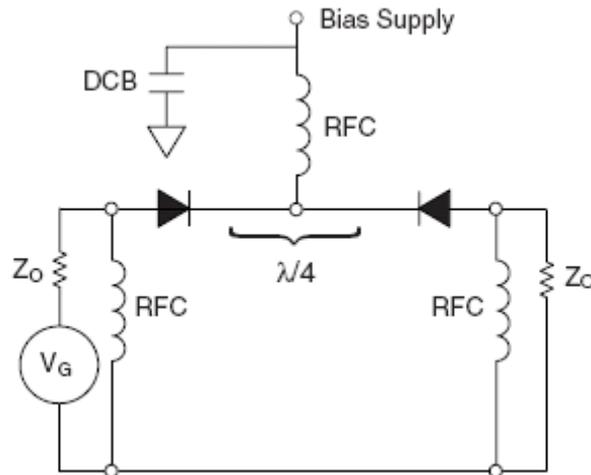


3.1.4 Switch Tuned con PIN

Uno switch tuned si ottiene separando di un quarto di lunghezza d'onda i due diodi PIN, ottenendo pertanto un isolamento doppio.

3.1.4.1 Serie

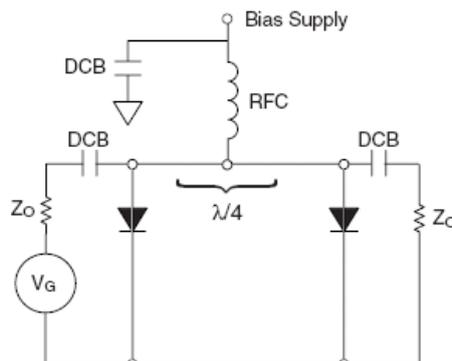
Quando lo switch è ON entrambe i PIN sono polarizzati direttamente quindi conducono, la linea che li interconnette è adattata quindi indipendentemente dalla sua lunghezza lascia passare il segnale ed il circuito rimane adattato.



Quando lo switch è OFF entrambe i PIN sono polarizzati inversamente e quindi caratterizzabili come circuiti aperti, considerando la rete a sinistra della linea a quarto d'onda, essa si comporta complessivamente come un aperto, che all'altro estremo della linea viene visto come un corto circuito pertanto vi è completo disadattamento con l'aperto che invece modella la rete a destra della linea, il risultato è pertanto un incremento dell'isolamento.

3.1.4.2 Shunt

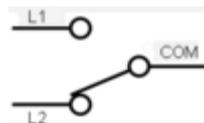
Lo switch è OFF se tutti e due i PIN sono polarizzati direttamente e quindi non si ha trasferimento di potenza verso il carico perché il PIN che ha in parallelo equivale ad un corto che visto all'altro estremo del trasformatore a quarto d'onda si comporta come un aperto e quindi non si ha trasferimento di potenza, inoltre anche il PIN in parallelo al generatore è in corto e quindi aumenta l'isolamento verso il carico.



Quando lo switch è ON entrambe i PIN sono polarizzati inversamente e quindi caratterizzabili come circuiti aperti quindi dall'altra parte del trasformatore a quarto d'onda si vede un corto e si ha trasferimento di potenza.

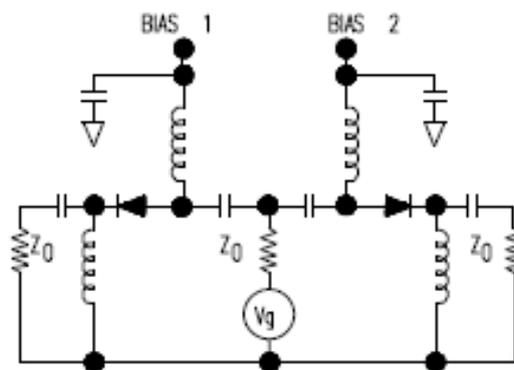
3.2 SPDT

Uno switch SPDT ha il compito di trasferire il segnale d'ingresso verso una di due possibili uscite, il tutto sulla base di un segnale di controllo il quale attiva il trasferimento del segnale verso una uscita ed inibisce il trasferimento dello stesso verso l'altra uscita.



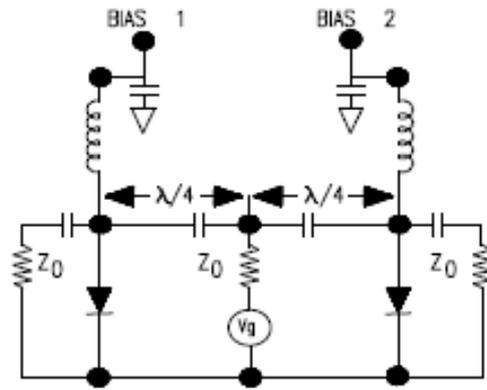
3.2.1 Realizzazione con PIN in serie

A tutti gli effetti è come avere due rami SPST realizzati come nella sezione precedente, soltanto l'isolamento aumenta di 6dB in quanto in parallelo al ramo OFF si ha il ramo ON il quale presenta una terminazione a 50Ω e quindi la potenza che si avrebbe sul PIN del ramo OFF è la metà di quella che si ha in un SPST.



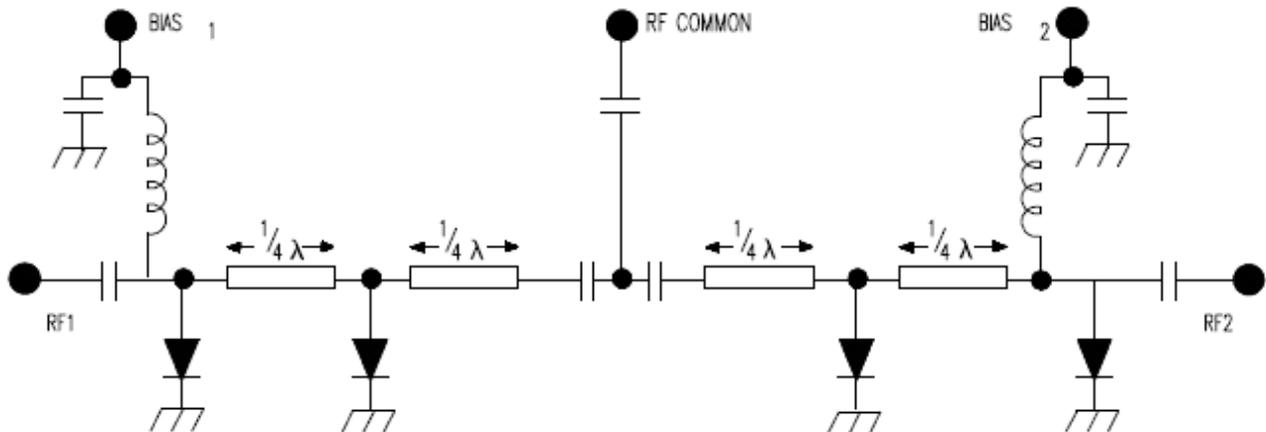
3.2.2 Realizzazione con PIN shunt

Con l'inserimento dei trasformatori a quarto d'onda si ottiene un miglioramento dell'isolamento pari a 3 dB rispetto alla medesima configurazione serie tuttavia la banda si dimezza.



Quando uno dei due PIN è polarizzato direttamente esso conduce ed è assimilabile ad un corto circuito che all'altro estremo del trasformatore a quarto d'onda è visto come un circuito aperto pertanto non andrà potenza RF verso quel ramo dello switch, sull'altro ramo invece l'altro PIN viene polarizzato inversamente e quindi è assimilabile ad un circuito aperto, per la presenza del trasformatore, viene visto come un corto circuito e quindi tutta la potenza affluisce al carico.

Un miglioramento delle prestazioni in termini di isolamento può essere ottenuto mettendo in serie su ogni ramo due sezioni a quarto d'onda terminate da un diodo come nel seguente schema

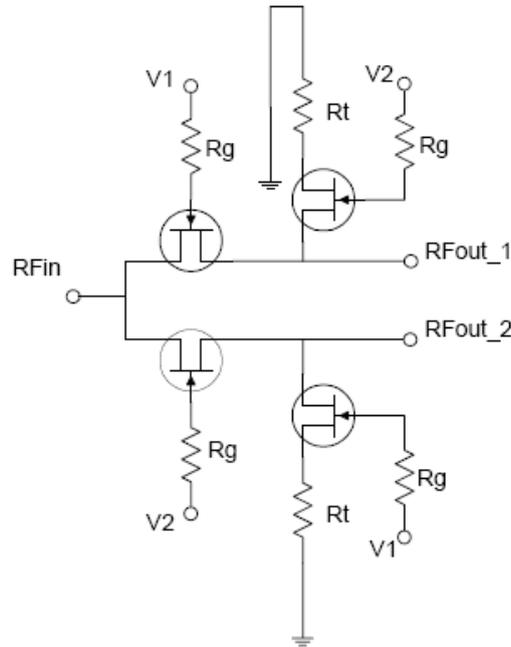


tuttavia aumenta anche l'Insertion Loss essendo aumentato il numero di componenti passivi che il segnale RF incontra nel percorso tra la sorgente ed il carico.

3.2.3 Realizzazione composita con FET

La realizzazione di un SPDT con FET viene illustrata nel seguente schema dove su ogni ramo i due FET si trovano uno ON e l'altro OFF, ad esempio supponendo di voler trasferire il segnale d'ingresso verso l'uscita 2 si ha che il ramo 1 deve essere interdetto, ciò si ottiene applicando una tensione negativa che interdice il FET in serie ed una tensione positiva o nulla che invece manda in conduzione il FET shunt, in tal modo si ha infatti che l'uscita 1 è terminata

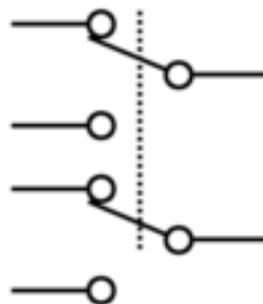
sulla resistenza R_t mentre il compito delle resistenze R_g è di separare comunque il path in continua da quello RF.



In realtà il medesimo switch si poteva realizzare semplicemente con i soli FET in serie ma in tal caso l'isolamento offerto sarebbe stato limitato e soprattutto ridotto al crescere della frequenza. Si sarebbe potuto ovviare realizzando dei FET di dimensioni più piccole ma questo avrebbe portato ad un incremento della Insertion Loss ed una degradazione della capacità di trattare segnali di potenza elevata, con questa realizzazione invece si ha un aumento dell'isolamento di circa 10dB rispetto alla realizzazione con soli FET in serie mentre l'Insertion Loss rimane sostanzialmente inalterata.

3.3 DPDT o Transfer Switch

A seconda della polarizzazione il Transfer Switch consente di inviare una coppia di segnali di ingresso ad una coppia di uscite oppure ad un'altra coppia.

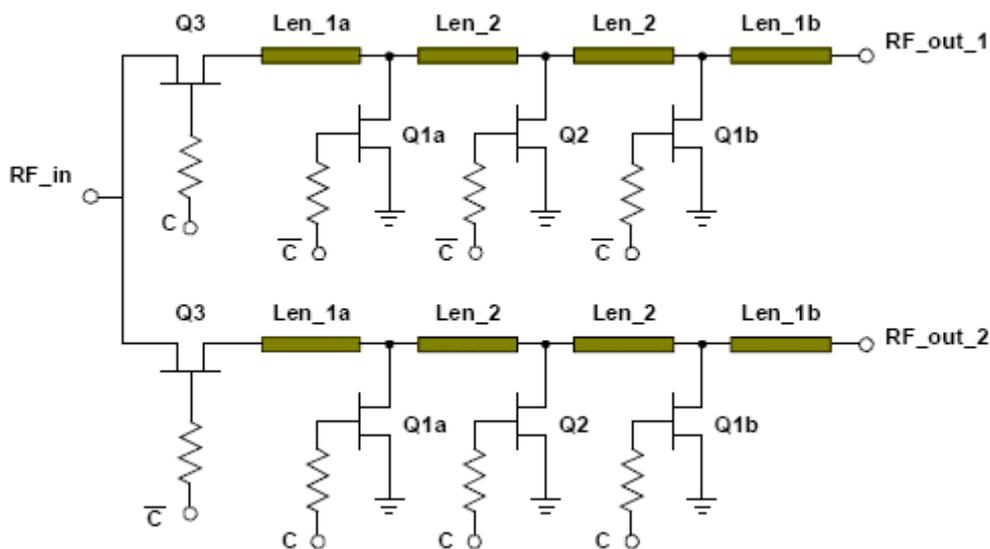


Può essere ottenuto semplicemente utilizzando lo stesso circuito di controllo per due diversi SPDT.

4. Realizzazione di uno switch RF DPDT tuned

Nel seguito viene descritta la realizzazione di uno switch DPDT o Transfer Switch con prestazioni che vanno dalla continua sino a 20GHz. Al fine di includere la continua è necessario utilizzare dei FET piuttosto che i diodi PIN, in particolare verrà descritta una implementazione con PHEMT i quali quando sono in regione lineare, per $V_{GS} = 0V$, sono caratterizzati da una resistenza di $1.8\Omega/mm$ mentre quando sono oltre il Pinch-Off, per V_{GS} di circa $-5V$, sono modellati da una resistenza di circa $10k\Omega/mm$ ed una capacità di $0.3pF/mm$.

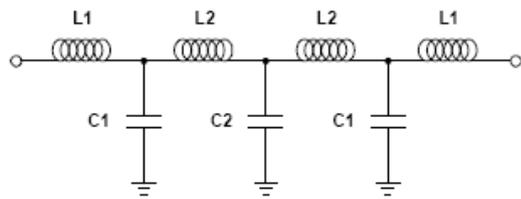
La realizzazione del DPDT viene effettuata in maniera banale utilizzando due SPDT pilotati in parallelo tramite la stessa logica, per ciascuno di essi non si può utilizzare una semplice topologia shunt-serie in quanto la capacità di $0.3pF/mm$ non consente di avere un buon isolamento sino a frequenze di 20GHz, per ovviare si ricorre ad una topologia distribuita che assorbe tale capacità in un filtro passa basso secondo il seguente schema:



In particolare date le frequenze in gioco le induttanze vengono realizzate tramite sezioni di linee, nel ramo ON dello switch esse formano il filtro passa basso, con frequenza di taglio superiore a 20GHz, insieme alle capacità presentate dai pHEMTs shunt polarizzati con una tensione di $-5V$ e quindi interdetti, ne risulta che il segnale di ingresso viene trasferito a quella uscita inalterato, ovviamente al pHEMT serie viene applicata una tensione di $0V$ sul Gate per lasciare passare il segnale.

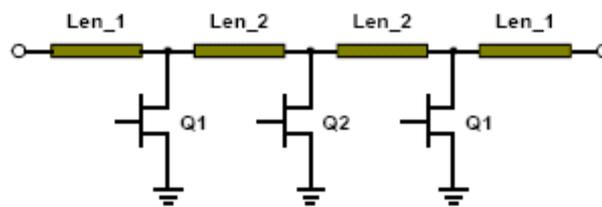
Sul ramo OFF invece i pHEMTs shunt si presentano come dei corto circuiti verso massa, e quindi incrementano l'isolamento, mentre il pHEMT serie è interdetto e a basse frequenze non lascia passare il segnale mentre ad alte frequenze l'isolamento sarebbe basso se non fosse che il primo tratto di linea è un trasformatore a quarto d'onda che fa sì che il pHEMT serie veda alla sua destra un circuito aperto.

Nella realizzazione si è partiti progettando un filtro Tchebychev passa basso del 7° ordine.

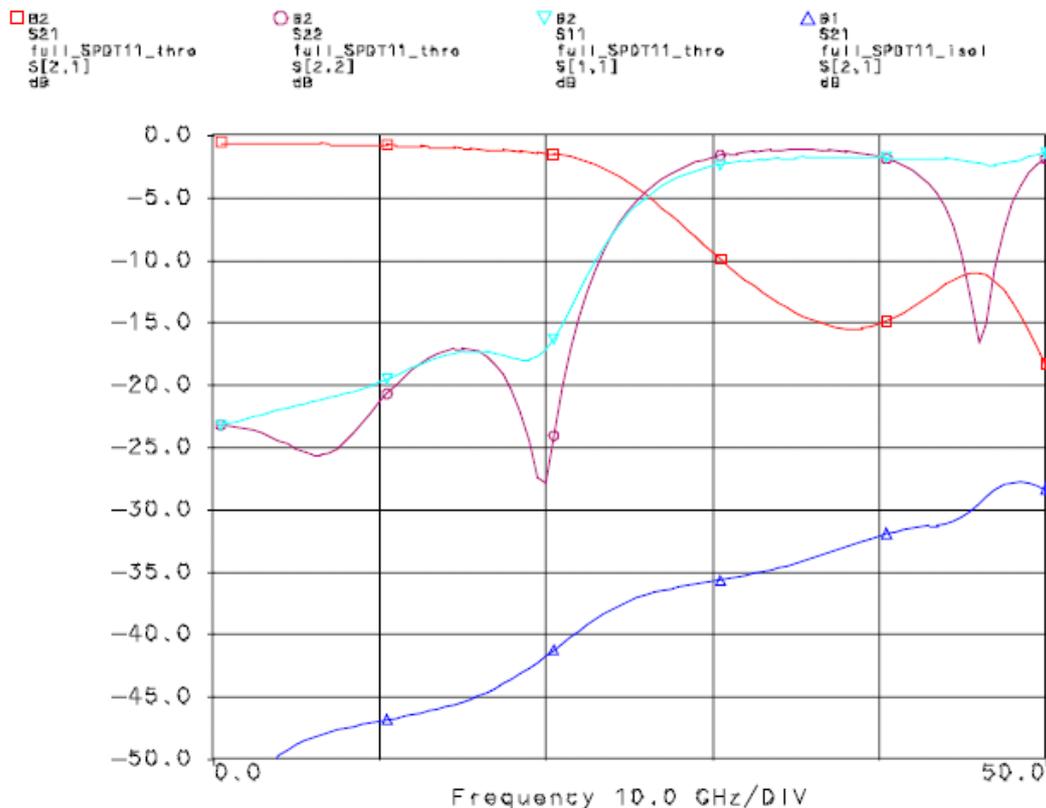


Component	Value	Units
L1	0.291	nH
L2	0.637	nH
C1	0.203	pF
C2	0.238	pF

Successivamente sono state sostituite le capacità con dei pHEMTs le cui dimensioni sono tali da presentare una capacità parassita nello stato OFF proprio uguale al valore della capacità che il determinato pHEMT sostituisce nel filtro. A seguire sono stati sostituiti gli induttori con tratti di linea in microstriscia di lunghezza opportuna.



Si è infine passati all'inserimento del pHEMT in serie sui due rami, ed alla successiva ottimizzazione, il risultato della simulazione dello switch SPDT completo è illustrato nella seguente figura:



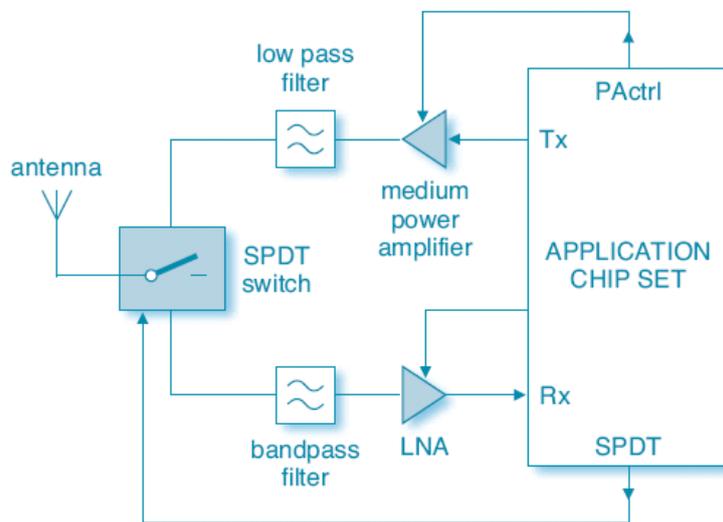
Si evidenzia un isolamento di oltre 40dB nella banda considerata.

5. Principali applicazioni degli switches RF

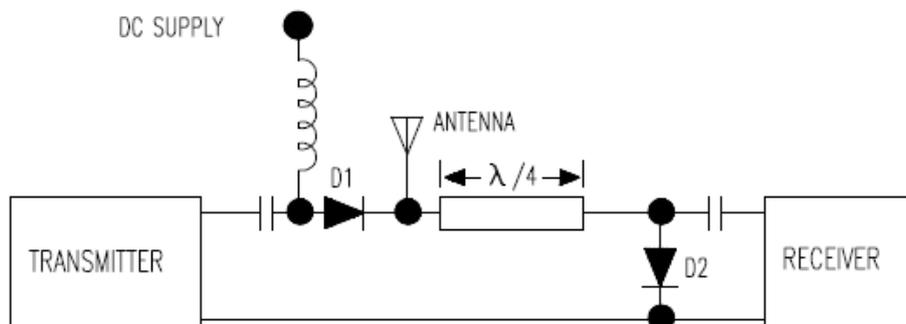
In questo capitolo a titolo esemplificativo vengono mostrate alcune delle possibili implementazioni degli switches a radiofrequenza, tre di esse sono sistemi d'antenna mentre una quarta applicazione utilizza i MEMS per ottenere la taratura automatica dei circuiti in alta frequenza.

5.1 Switch Tx/Rx

Nei ricetrasmittitori solitamente viene utilizzata un'unica antenna sia per la trasmissione che per la ricezione, uno switch SPDT viene utilizzato quindi per connettere l'antenna o all'amplificatore di potenza oppure al ricevitore secondo il seguente schema:



Un esempio di realizzazione con diodi PIN è in seguente:

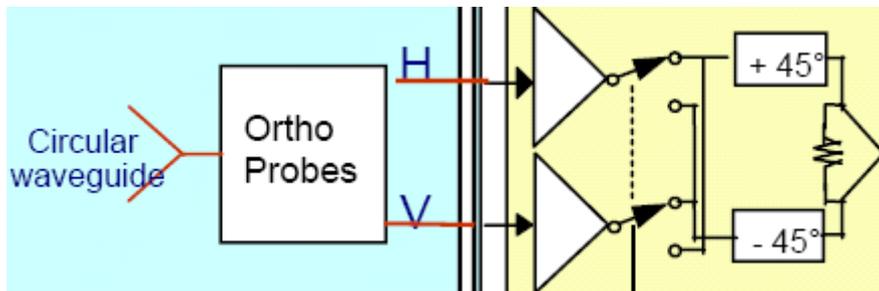


in un caso si ha che se il PIN D_2 è polarizzato direttamente, ed è pertanto approssimabile con un corto circuito, quindi all'altro estremo del trasformatore a quarto d'onda si vede un circuito aperto e così si ha che il ricevitore è separato e tutta la potenza dal trasmettitore va nell'antenna tramite il PIN D_1 anche esso polarizzato direttamente.

Polarizzando invece inversamente entrambe i PIN si ha che D_2 si presenta come un circuito aperto il quale all'altra estremità del trasformatore a quarto d'onda è visto come un corto circuito e quindi la potenza in arrivo dal trasmettitore non viaggia verso il ricevitore sia per questo motivo che per il fatto che il D_1 è anche esso polarizzato inversamente e pertanto è equivalente ad un circuito aperto.

5.2 Selettore di polarizzazione

Nel circuito seguente abbiamo una antenna costituita da due dipoli ortogonali la quale riceve un segnale con polarizzazione circolare, volendo estrarre una delle due componenti basta osservare che esse sono sfasate tra di loro di 90° pertanto anticipandone una di 45° e ritardandone l'altra sempre di 45° si ha che i due contributi su un ramo sono in fase mentre sull'altro ramo si elidono.



Il circuito richiede pertanto un transfer switch, DPDT, il quale associa alle due linee di ingresso una coppia di linee di uscita oppure un'altra coppia.

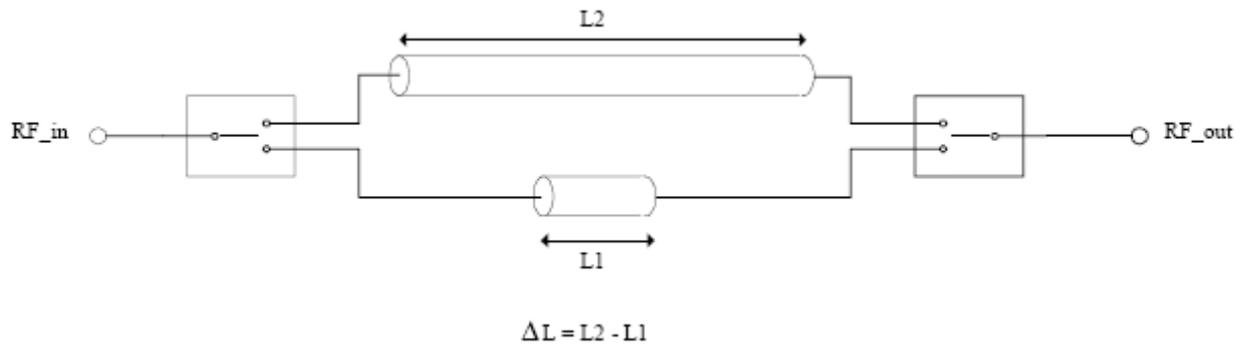
5.3 Phase Shifter

I phase shifter stanno acquisendo sempre maggiore importanza per via del fatto che con essi è possibile realizzare antenne il cui lobo di radiazione può essere configurato dinamicamente semplicemente variando le relazioni di fase tra il segnale che arriva ai diversi feed dell'array.

In questa sezione verrà analizzato il principio di funzionamento di due semplici phase shifter che richiedono l'utilizzo di switches, lo Switched Delay Line e lo Switched Filter.

5.3.1 Switched Delay Line

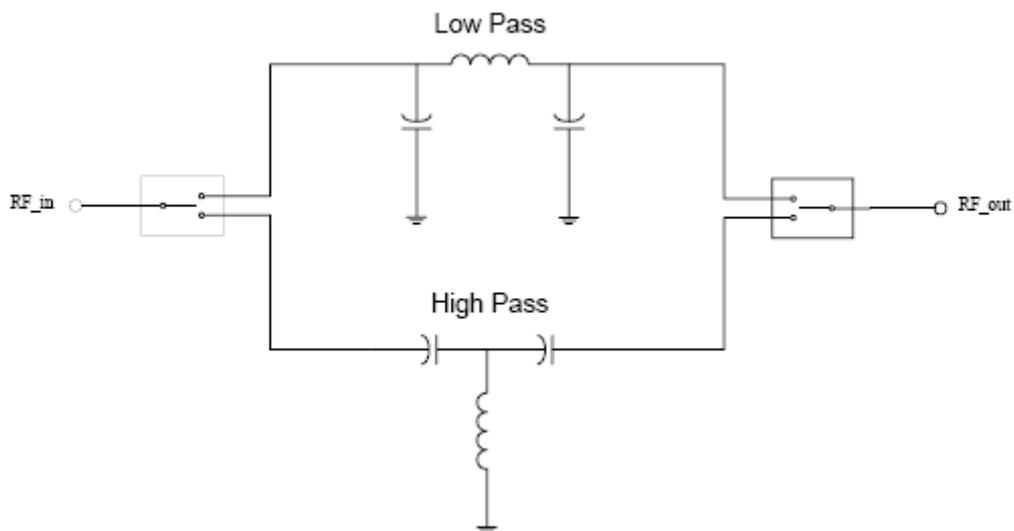
Si basa sul fatto che un segnale che attraversa una linea di trasmissione viene ritardato e quindi sfasato di un angolo che dipende anche dalla lunghezza della linea di trasmissione oltre che dalla frequenza e dalla velocità di fase nel mezzo.



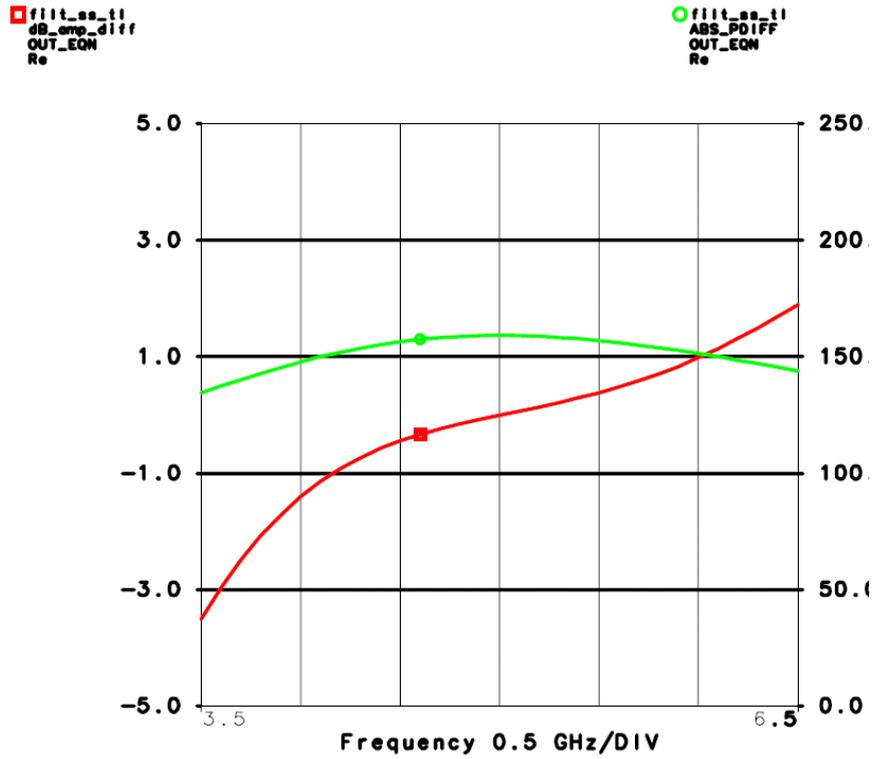
Il funzionamento è pertanto molto semplice, mediante due switches SPDT operati in sincronia si fa in modo che il segnale attraversi il ramo superiore oppure il ramo inferiore subendo pertanto lo sfasamento dovuto alla lunghezza L_1 oppure lo sfasamento dovuto alla lunghezza L_2 . Gli svantaggi di questa configurazione sono che le sue dimensioni aumentano al diminuire della frequenza e che lo stesso sfasamento introdotto è esso stesso funzione della frequenza.

5.3.2 Switched Filter Phase Shifters

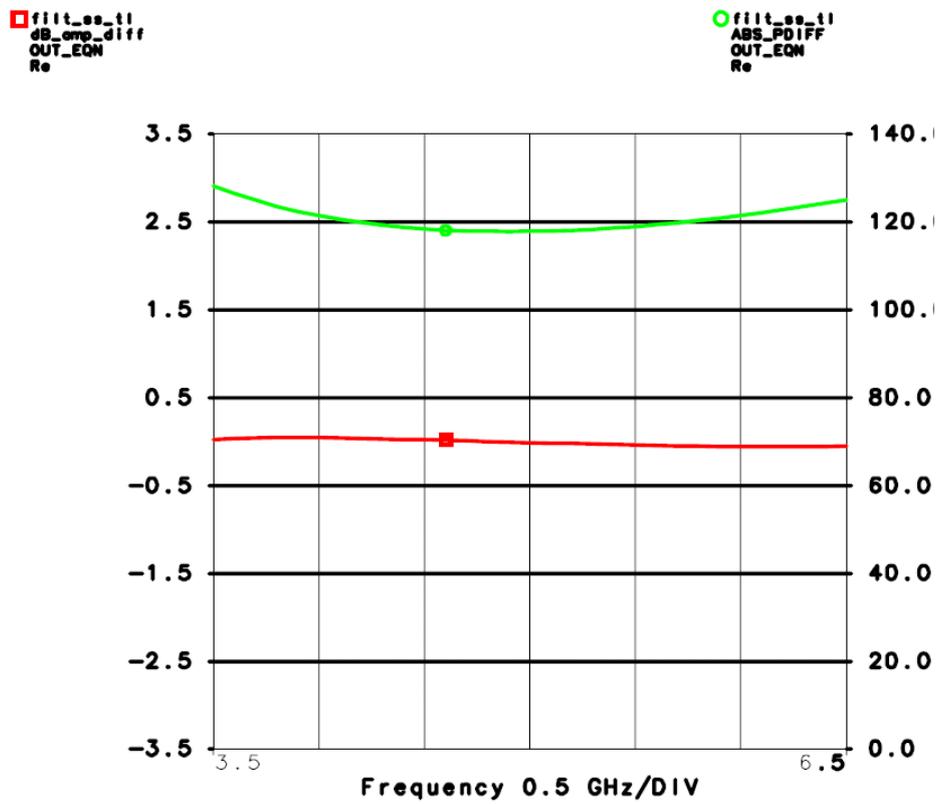
Utilizza il differente sfasamento subito da un segnale che attraversa un filtro passa basso piuttosto che un filtro passa alto, si sceglie tra i due mediante la coppia di switches SPDT che lavorano insieme attivando il ramo superiore oppure il ramo inferiore.



Nel circuito in figura sono illustrate dei filtri di Tchebischeff del terzo ordine entrambe con frequenza di cutoff a 5 GHz, si ha che pur essendo la differenza di fase tra i due filtri sostanzialmente costante la differenza di ampiezza presenta una escursione di diversi dB



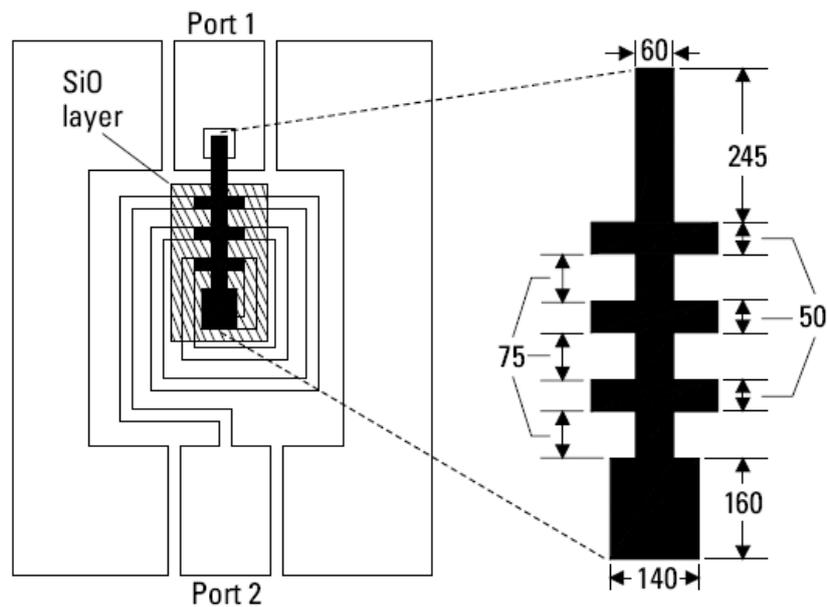
il circuito può essere tuttavia ottimizzato per ottenere ad esempio uno sfasamento di 120° e differenza di ampiezza nulla, il risultato dopo l'ottimizzazione è nella figura seguente:



5.4 Tuning di amplificatori RF

Gli amplificatori RF necessitano di reti di adattamento al fine di ottenere un guadagno di potenza ottimale, questo viene effettuato da tecnici specialisti i quali a tentativi connettono alcuni pads in metallo realizzati a questo scopo sul substrato, si tratta di una operazione lunga e laboriosa che male si presta a catene di produzione con numeri di pezzi elevati.

La soluzione proposta è di utilizzare degli switches RF a MEMS, ciascuno di essi utilizza un metallo il quale viene fatto scorrere a collegare oppure no due tratti di linea.



Il vantaggio di questo approccio è che un computer può misurare la risposta dell'amplificatore e attivare gli switches al fine di trovare la configurazione ottimale, successivamente al tuning è possibile lasciare gli switches nella loro posizione finale al fine di evitare consumo addizionale di potenza.

6. Conclusioni

Dopo aver individuato i principali parametri di progetto sono state individuate le tipologie di switches a radiofrequenza attualmente sul mercato, è inoltre stata effettuata una analisi comparativa al fine di identificare i vantaggi competitivi ed i potenziali settori di applicazione delle diverse tipologie.

Sono stati descritti alcuni schemi di implementazione per le principali configurazioni di switches ossia SPST, SPDT e DPDT, per questa ultima è stata poi proposta una metodologia di progetto volta ad ottenere una banda passante di 20GHz.

Infine sono state individuate alcune potenziali applicazioni degli switches RF molte delle quali orientate a sistemi di antenna.

Lista delle abbreviazioni

MEMS	Micro Electro Mechanical System
DPDT	Double Pole Double Throw
FET	Field Effect Transistor
HEMT	High Electron Mobility Transistor
JFET	Junction FET
MESFET	Metal Semiconductor FET
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor FET
pHEMT	pseudomorphic HEMT
SPDT	Single Pole Double Throw
SPST	Single Pole Single Throw

Bibliografia

- [1] “*RF MEMS Switches and switchCircuits*”, Gabriel M. Rebeiz, Jeremy B. Muldavin, IEEE microwave magazine, December 2001

- [2] “*A Monolithic, Dual Channel, DC to 20GHz SPDT*”, S.Williamson, L.M.Devlin, G.A.Pearson, P.D.L.Beasley, Plextek

- [3] “*THE PIN DIODE CIRCUIT DESIGNERS’ HANDBOOK*”, MICROSEMI

- [4] “*The Design of Integrated Switches and Phase Shifters*”, Liam Devlin

- [5] “*RF Design Guide*”, Peter Wismuller, McGnw-Hill. 1989.

- [6] “*“Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structures*”, Peter Wismuller, McGnw-Hill. 1989.

- [7] “*Design Trade-offs for High Linearity pHEMT Switches*”, Andrew Dearn, Liam Devlin, Plextek

- [8] “*DC - 40GHz and 20 - 40 GHz MMIC SPDT Switches*”, M. Schindler, A. Morris, 1987 IEEE Microwave and Millimeter Wave Monolithic Circuits Symposium Digest, pp. 85-88

- [9] “*6-19 GHz GaAs FET Transmit-Receive Switch*”, Y. Ayasli, R. Mozzi, L. Reynolds, T. Tsukii, 1983 GaAs IC Symposium Digest, pp. 106- 108

- [10] “*Microwave Switching with GaAs FET*”, Y. Ayasli, Microwave Journal, vol. 25, No. 11 pp. 61-74, 1982.