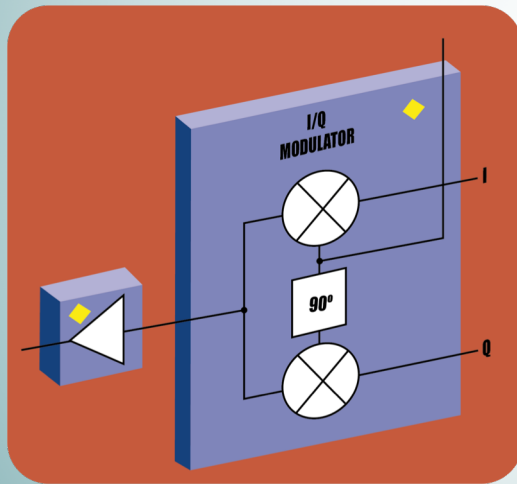


Electrónica de Radiofrecuencia

TEMA 3. MEZCLADORES



Juan Pablo Pascual Gutiérrez

Enrique Villa Benito

Luisa María de la Fuente Rodríguez

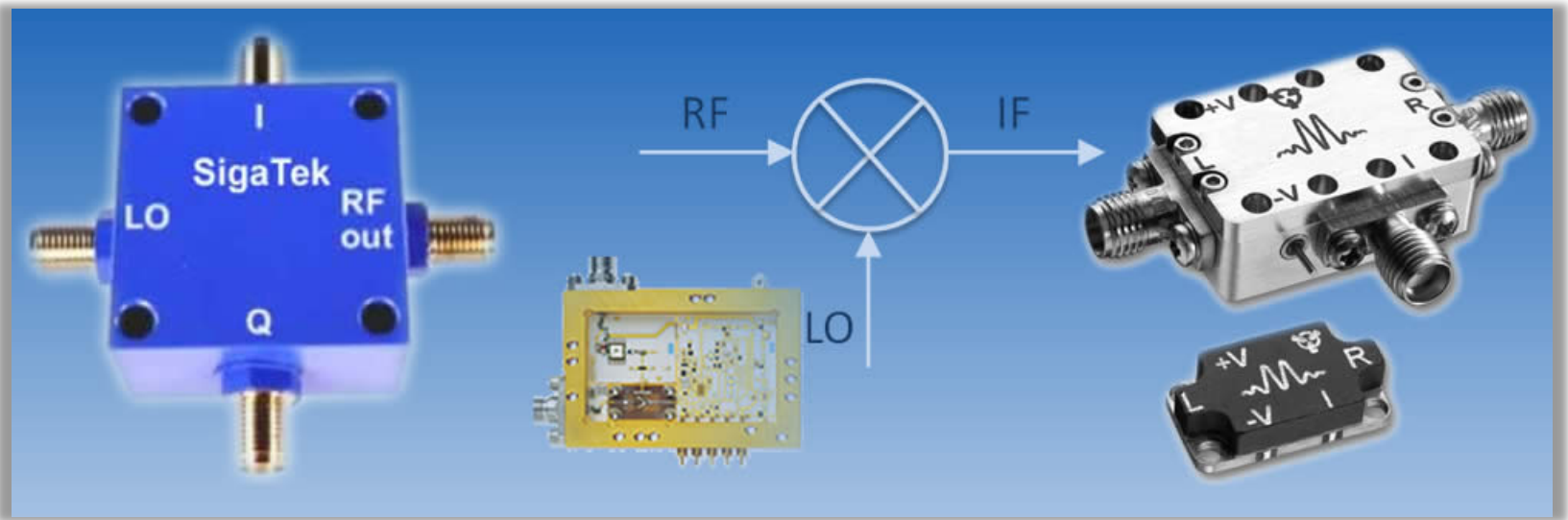
José Ángel García García

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES

Este material se publica bajo la siguiente licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)





CIRCUITOS MEZCLADORES

Índice del tema

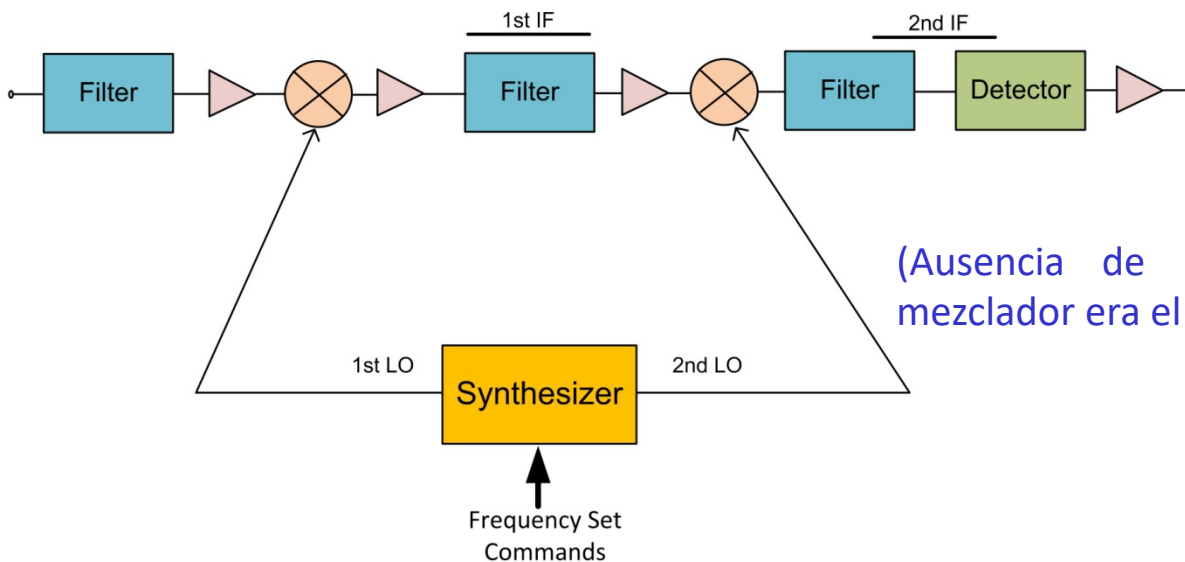
1. Introducción
2. Dispositivos para mezcladores
3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación
4. Mezcladores a Diodo
5. Mezcladores a diodo Equilibrados
6. Mezcladores activos: mezcladores a FET
7. Mezcladores equilibrados & doblemente equilibrados a FET

Bibliografía

- S. A. Maas, “ **The RF and Microwave Circuit Design Cookbook**”, Artech House, 1998.
- I. Bahl & P. Bhartia, “**Microwave solid State Circuit Design**”, Wiley 2nd Edition.
- S. A. Maas, “**Microwave Mixers**”, 3rd Edition, Artech House, MA
- “**Microwave Devices, Circuits, and Systems for Communications Engineering**”,
Ed I.G. Glover, S.R. Pennock and P.R. Shepherd, Wiley, 2005.
- G.D. Vendelin, A.M. Pavio, U.L. Rohde, “**Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques**”, 2nd Edition, Wiley 2005.
- R. Ludwig, P. Bretchko, “**RF Circuit Design. Theory and Applications**”.
Prentice Hall, 2000.

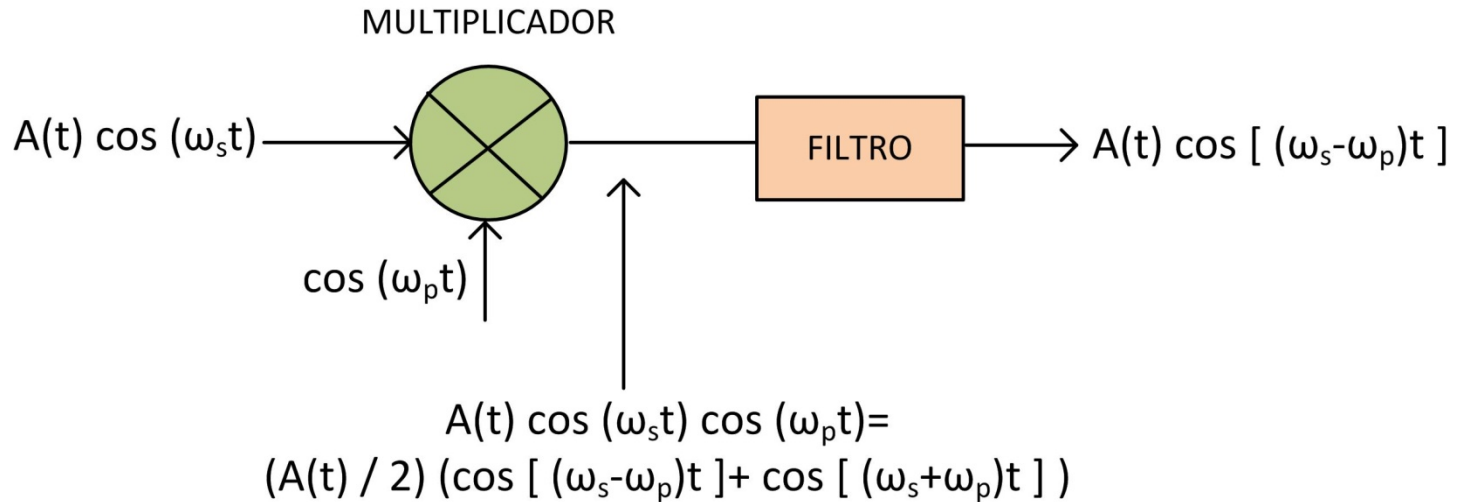
1. Introducción

- Inventor del mezclador: Major Edwin Armstrong
- Primero en utilizar tubos de vacío como conversor de frecuencia de RF → frecuencia intermedia
- Se le atribuye el desarrollo del “receptor superheterodino”
- Gran desarrollo durante del II guerra mundial (sistemas Rádar)



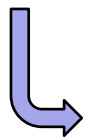
- Gran mejora en prestaciones a partir de los años (40 y 50)
 - (NF < 4 dB @ 50 GHz)

1. Introducción



Componentes de la señal en un mezclador ideal

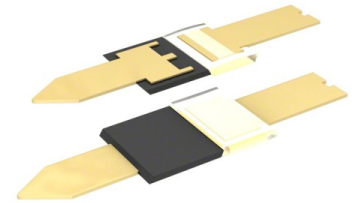
Multiplicación : \Rightarrow Cualquier dispositivo no lineal



- Producto de la mezcla deseado
 - Armónicos LO
 - Productos de la mezcla no deseados
- } Filtrado

2. Dispositivos para Mezcladores

- En teoría → cualquier dispositivo “no lineal”
- En la práctica debe cumplir:
 - » Fuerte no linealidad
 - » Propiedades eléctricas repetibles (yield)
 - » Bajo Ruido
 - » Adecuada respuesta en frecuencia
 - » Baja distorsión



Diodo Schottky: beam-lead



Diodos Schottky: axial y SMD

2.1 Diodo de Barrera Schottky

- Dispositivos más utilizados (unión metal-semiconductor)
- Modernos procesos fabricación permiten funcionar frec. > 1000 GHz
- En GaAs mayor movilidad electrónica y mayor v. saturación frente Si

2. Dispositivos para Mezcladores

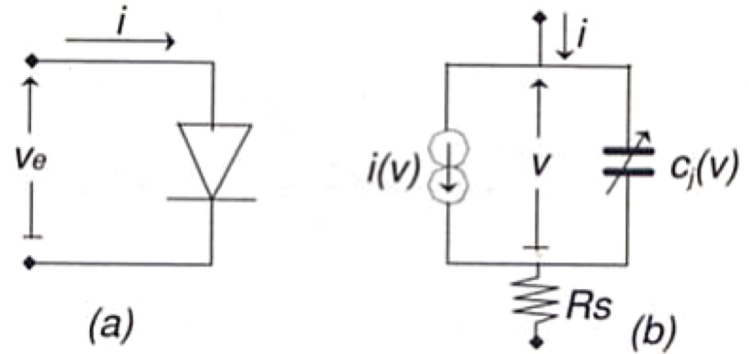
2.1.1 Circuito equivalente no lineal

$$i(v) = I_{ss} \left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right)$$

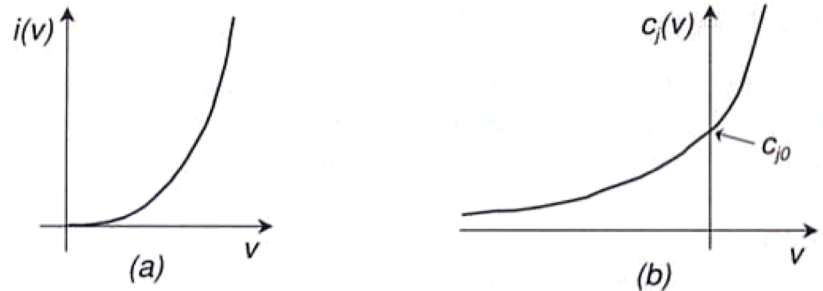
I_{ss} : corriente de saturación
 K : cte. Boltzmann
 T : Temperatura absoluta
 n : factor de idealidad (1.0—1.25)

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{V}{\phi_{bi}} \right)^\gamma}$$

C_{j0} : C de la unión a tensión cero
 Φ_{bi} : Tensión de la barrera
 γ : (0.5-0.33)



Circuito equivalente no lineal del diodo Schottky



Características de la corriente y capacidad del diodo Schottky

2. Dispositivos para Mezcladores

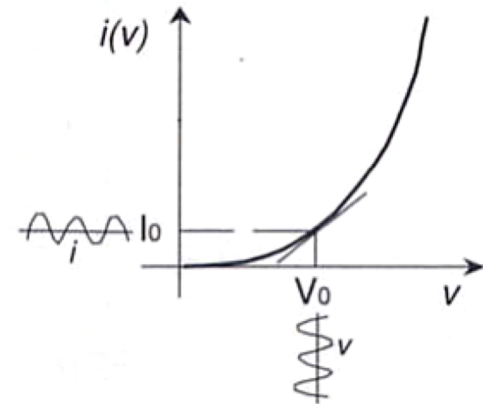
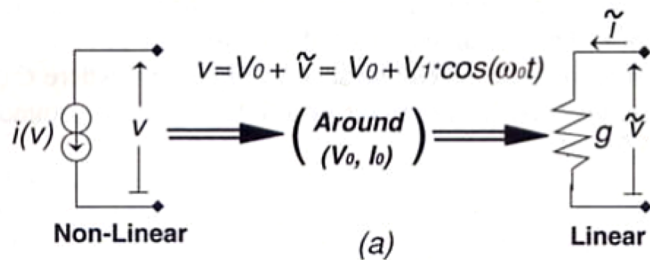
2.1.2 Circuito equivalente lineal y punto de operación

$$v = V_0 + V_1 \cos \omega_0 t \quad \begin{array}{l} \gg V_1 \text{ pequeña comparada con } V_0 \\ \gg \text{ Punto de operación } (V_0, I_0) \end{array}$$

$$i(v) = i(V_0 + V_1 \cos \omega_0 t) = i(V_0) + \left. \frac{\partial i}{\partial v} \right|_{V_0} \cdot v + \dots = I_0 + g(V_0) \cdot v = I_0 + i$$

Con $i = g(V_0) \cdot v$ (ec. Lineal)

$$g(v) = \frac{\partial i}{\partial v} = \frac{q}{nkT} I_{ss} e^{\frac{qv}{nkT}} = \frac{q}{nkT} (i(v) + I_{ss})$$



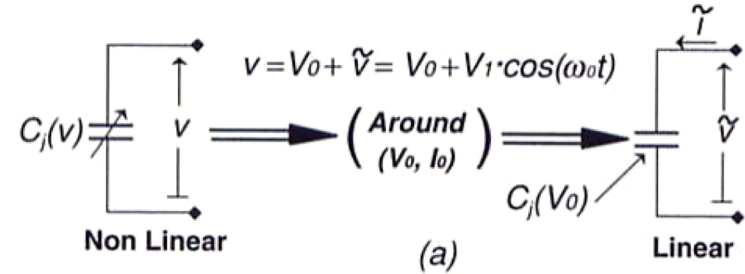
Linealización de la curva $i(v)$ del diodo

Circuito equivalente de la fuente de corriente

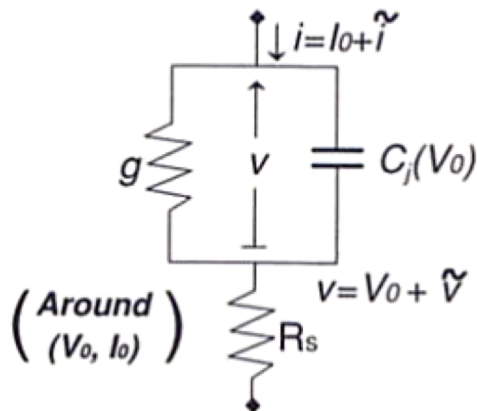
2. Dispositivos para Mezcladores

Para la capacidad:

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial v} \frac{dv}{dt} = C_j(v) \frac{dv}{dt}$$



$$Q(v) = Q[V_0 + V_1 \cos \omega_0 t] = Q(V_0) + \left. \frac{\partial Q}{\partial v} \right|_{V_0} V_1 \cos \omega_0 t$$



Circuito linealizado del diodo en torno (V_0, I_0)

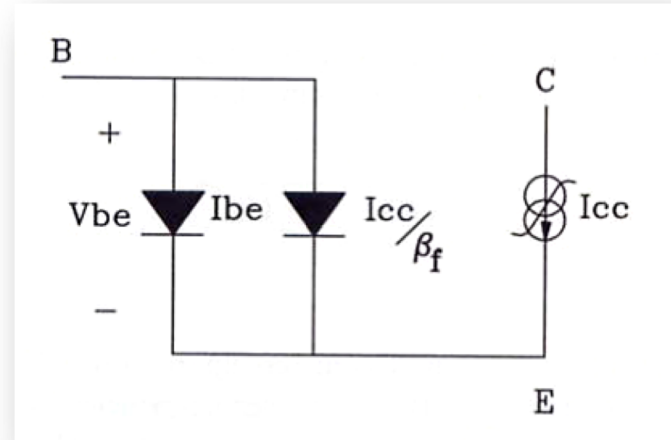
2. Dispositivos para Mezcladores

Cuando $V_{be} > 0$ y $V_{bc} < 0$

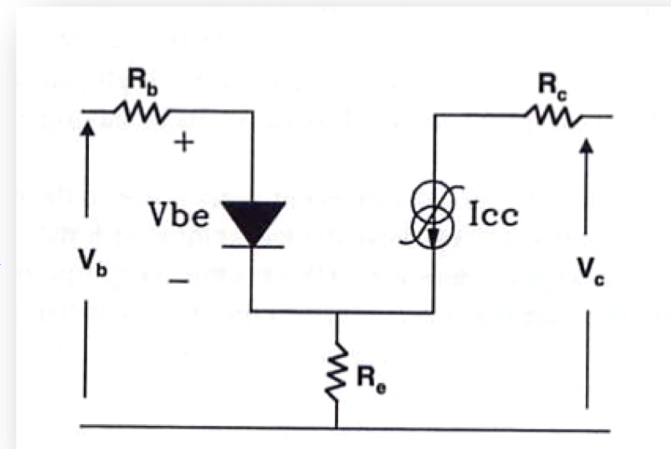
$$I_{cc} = I_{sf} \left[e^{\frac{V_{be}}{n_f kT}} - 1 \right]$$

$$I_{be} = I_{se} \left[e^{\frac{V_{be}}{n_e kT}} - 1 \right]$$

Circuito simplificado para polarización en directa con un solo diodo



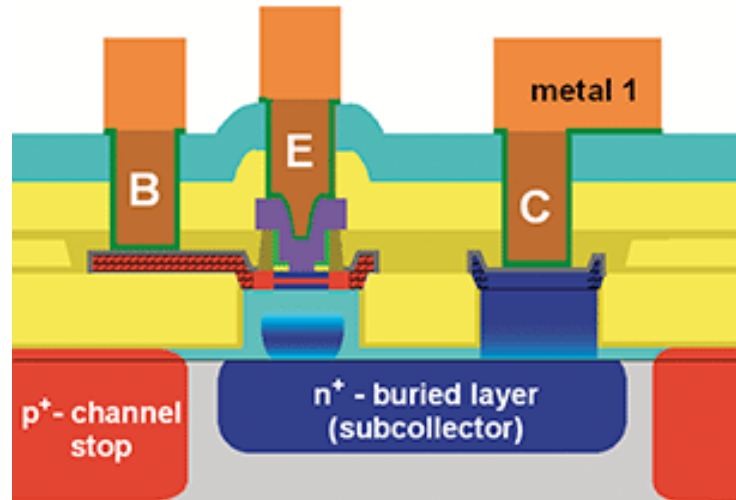
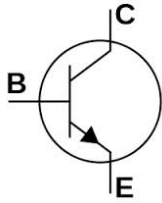
Circuito simplificado para polarización en directa



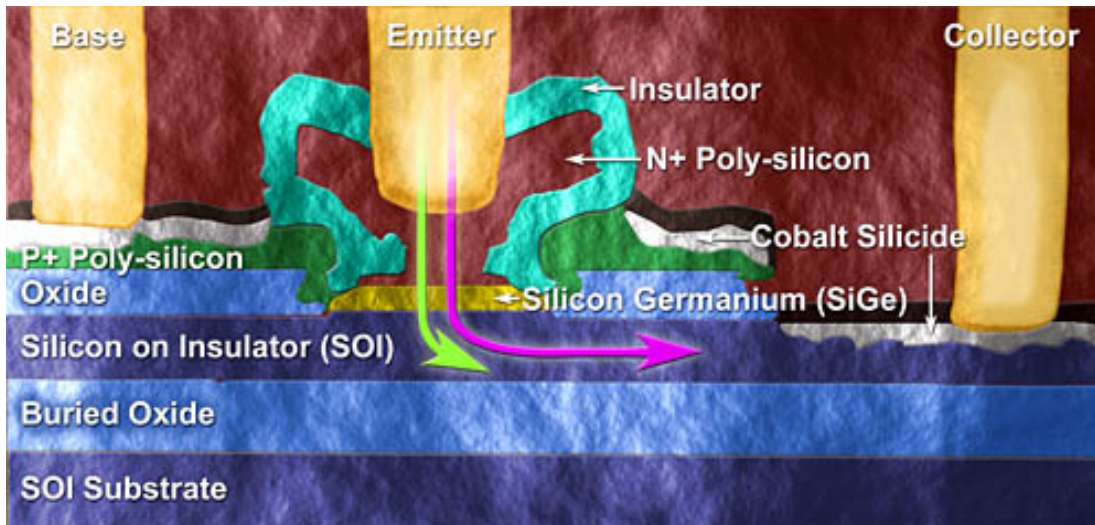
- En alta frecuencia las inductancias de acceso y capacidades no lineales se deben tener en cuenta

2. Dispositivos para Mezcladores

Transistor Bipolar



Transistor bipolar (Corte)



Transistor bipolar en SiGe

2. Dispositivos para Mezcladores

2.3 Transistor de Efecto de Campo (FET)

- Papel muy importante en el desarrollo de circuitos de RF y microondas con mezcladores en los sistemas de comunicaciones.
- La tecnología MMIC ha incrementado su importancia
- Tipos:

1. MOSFET (Metal Oxido Semiconductor FET)

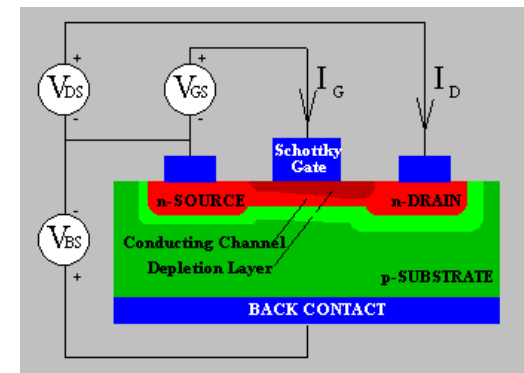
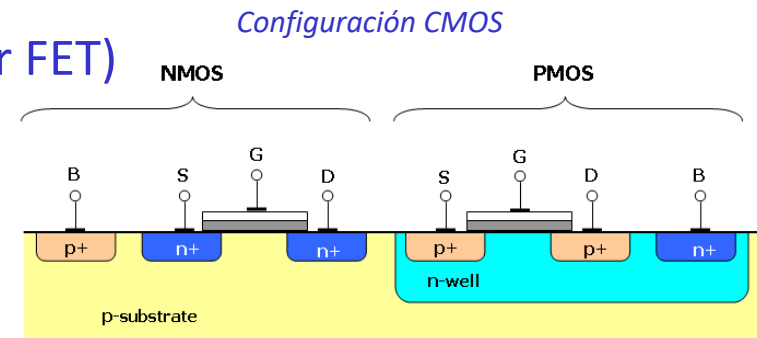
- En Si
- Alta capacidad de potencia
- Nivel de ruido alto (comparado con GaAs)
- Frecuencia de operación pocos GHz

2. MESFET (Si y GaAs)

- Si -> pocos GHz
- GaAs -> mayor frecuencia
- Muy utilizados en mezcladores

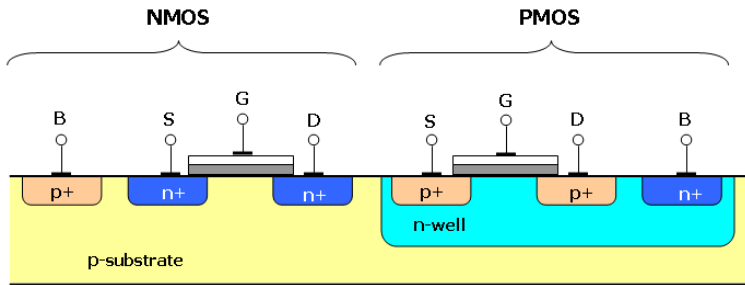
3. HEMT (pHEMT y MHEMT)

- Bajo ruido y alta ganancia hasta altas frecuencias

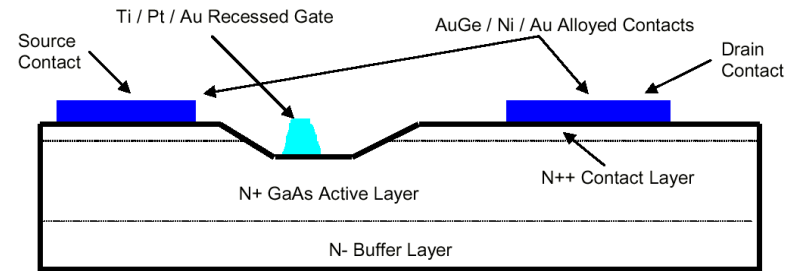


2. Dispositivos para Mezcladores

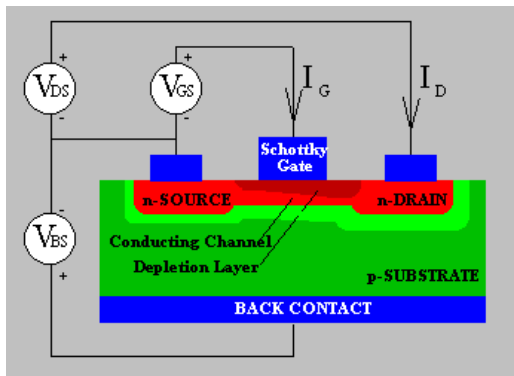
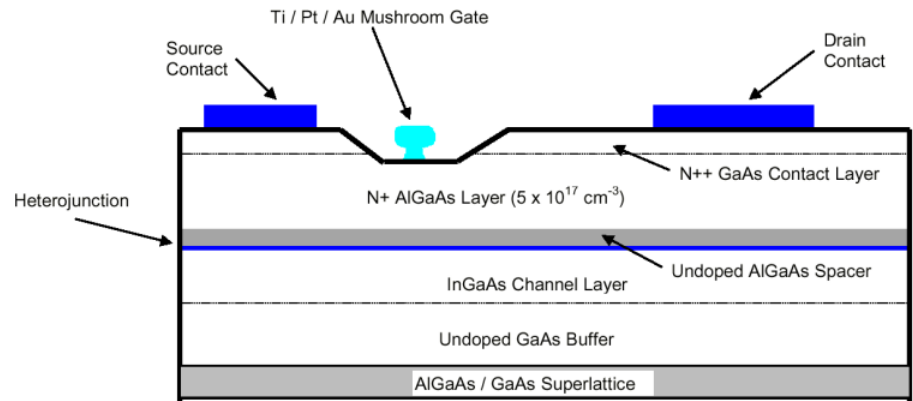
Configuración CMOS



GaAs MESFET STRUCTURE



PHEMT STRUCTURE



2. Dispositivos para Mezcladores

- Cuando se introducen dos señales de RF, I_{ds} se comporta de forma similar a un multiplicador ideal.
- La ecuación no lineal de I_{ds} según el modelo de Curtice:

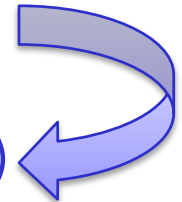
$$I_{ds}(V_{gi}, V_{di}) = \beta(V_{gi} - V_{T0})^2 - (1 + \lambda V_{di}) \operatorname{tgh}(\alpha V_{di})$$

- Cuando dos señales (RF y OL) se aplican en la región de saturación:

$$I_{ds} = \beta(V_{gi} - V_{T0})^2 \quad v_{RF} = A \cos(\omega_{RF} t)$$
$$v_{gi} = v_{RF} + v_{LO} \quad v_{LO} = B \cos(\omega_{LO} t)$$

$$I_{ds} = \beta[A' \cos(\omega_{RF} t) + B' \cos(\omega_{LO} t) - V_{T0}]^2 = a_0 + a_1 \cos(\omega_{RF} t) + a_2 \cos(\omega_{LO} t) + a_3 \cos(2\omega_{RF} t) + a_4 \cos(2\omega_{LO} t) + a_5 \cos(\omega_{RF} t) \cos(\omega_{LO} t)$$

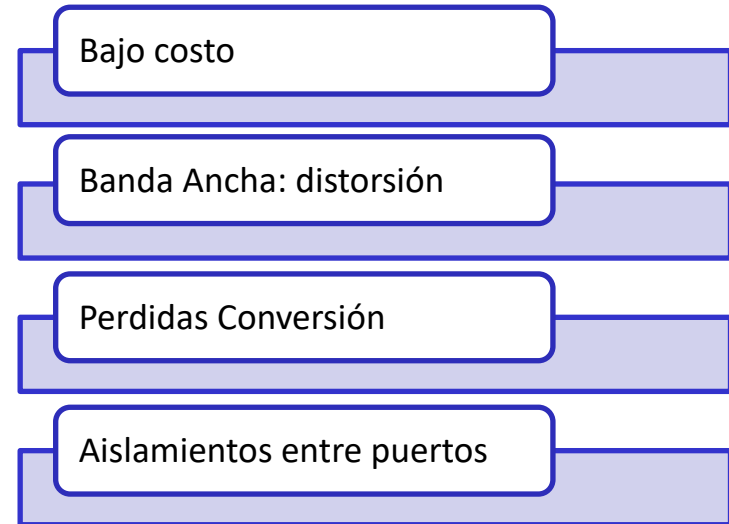
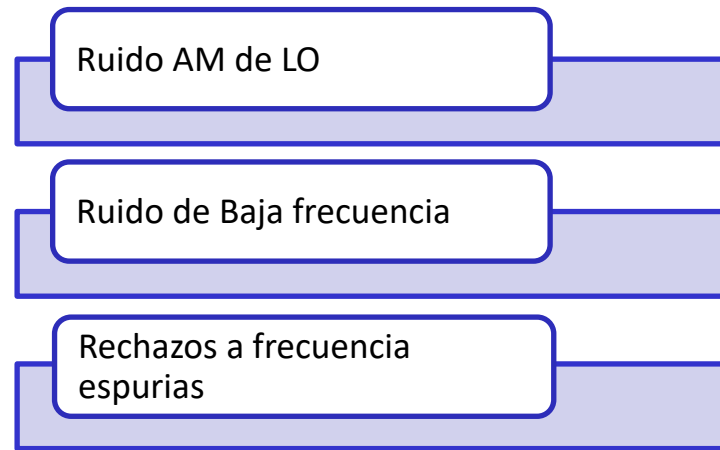
“suma y diferencia de frecuencias” (función de la mezcla)



- El resto se puede eliminar por filtrado

3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

- Aplicación de los diodos como mezcladores en MIT Radiation Laboratories (RADAR en los años 40)
- Mezcladores a diodo no son excelentes en nada
- Mezcladores a diodo tienen un comportamiento razonable en todo:



- Se usan mayoritariamente en receptores de comunicaciones
- También se usan en transmisores
- Se pueden emplear como moduladores y detectores de fase

3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

3.1 Frecuencias de la mezcla

- Los mezcladores a diodo se suelen llamar “mezcladores resistivos”



la mezcla se produce en una resistencia variable con el tiempo

- Considerar la forma de onda de una conductancia $g(t)$:

$$g(t) = G_0 + G_1 \cos(\omega_p t)$$

- Al aplicar un voltaje $v(t)$ a esa conductancia: $v(t) = V_s \cos(\omega_s t)$
- La corriente resultante será:

$$i(t) = g(t)v_s(t) = G_0 V_s \cos(\omega_p t) + \frac{G_1 V_s}{2} [\cos((\omega_s - \omega_p)t) + \cos((\omega_s + \omega_p)t)]$$

- La resistencia variable con el tiempo ha generado productos de mezcla a la frecuencia diferencia $\underline{\omega_s - \omega_p}$ y a la frecuencia suma $\underline{\omega_s + \omega_p}$
- La frecuencia diferencia suele ser la deseada

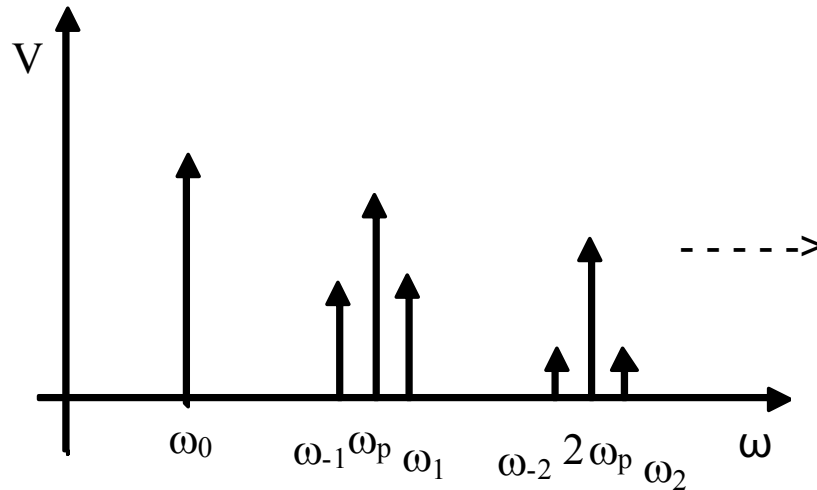
3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

- En la práctica la situación es más complicada:
 - La conductancia no es una senoide perfecta:

$$g(t) = G_0 + G_1 \cos(\omega_p t) + G_2 \cos(2\omega_p t) + G_3 \cos(3\omega_p t) + \dots$$

- Se obtienen los productos de la mezcla entre RF y los armónicos de ω_p

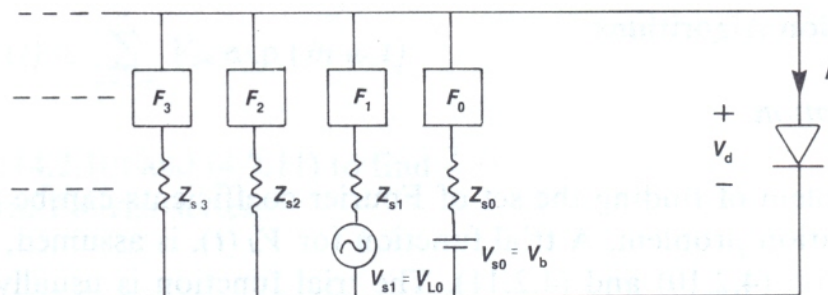
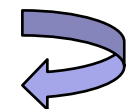
$$\omega_n = |\omega_s + n\omega_p| \quad \text{con } n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{ y } n \text{ entero}$$



con $\omega_n = |\omega_0 + n\omega_p|$
 $\omega_0 = |\omega_s - \omega_p|$ es la frecuencia intermedia
 ω_p es la frecuencia de oscilador local
 ω_s es la frecuencia de RF

3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

- En general, el diodo tiene componentes de V e I a todas las frecuencias de la mezcla
- Cambiando la impedancia de terminación del diodo a cualquier frecuencia afectará a las demás
- En este sentido, la conductancia variable con el tiempo es “red multipuerta”:
 - Las puertas son tensiones y corrientes a las frecuencias de la mezcla
 - No puertas físicamente separadas
- El comportamiento de un mezclador resistivo está determinado por:
 1. La forma de onda de la conductancia
 2. Las impedancias de terminación del diodo a todas las frecuencias de la mezcla



3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

3.2 Operación del Oscilador Local (LO)

- Como se obtiene $g(t)$?

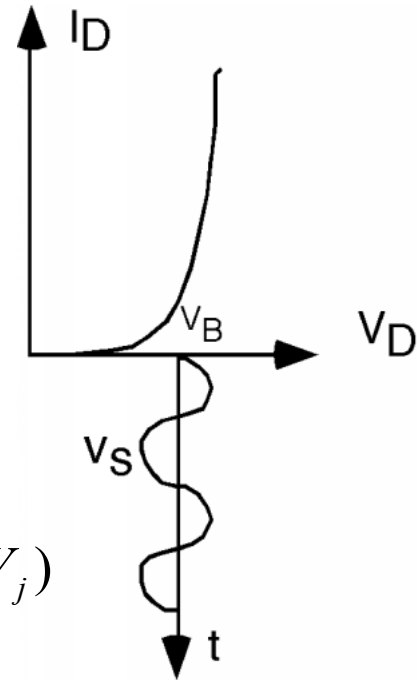
- La corriente del diodo:
$$I(V_j) = I_{ss} \left[e^{\frac{qV_j}{nKT}} - 1 \right]$$

- La conductancia
$$g(V_j) = \frac{\partial I}{\partial V_j} = \frac{q}{nkT} I_{ss} e^{\frac{qV_j}{nKT}} \cong \frac{q}{nkT} I_j(V_j)$$

- Si se conoce $V_j(t)$ se puede sustituir y obtener $g(t)$

- La técnica de “Balance Armónico” se utiliza para obtener $V_j(t)$

- Importante: la señal de LO en el diodo es la responsable de que se comporte como una conductancia variable con el tiempo



3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

3.3 Adaptación

- Adaptación conjugada en LO → minimizar las “pérdidas de conversión”
- Adaptación conjugada en las puertas RF/FI
- Qué significa adaptación conjugada aquí?

- Impedancia de entrada $Z_i(\omega) = \frac{V_d(\omega)}{I_d(\omega)}$

- Para cada frecuencia de RF y FI → $Z_i(\omega)$ es invariante con el tiempo

- $Z_i(\omega)$ varia con el nivel de LO

- En general → $Z_i(\omega)$ es alto para bajo nivel de LO

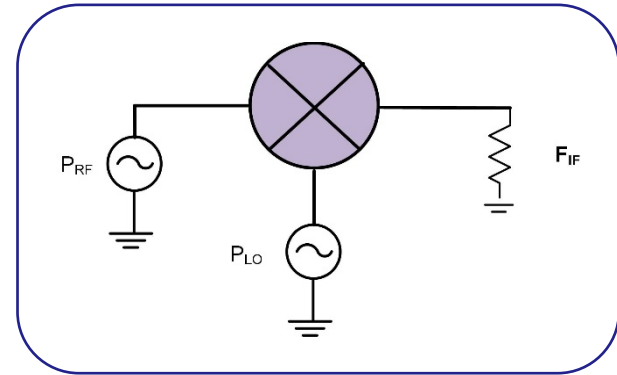
$Z_i(\omega)$ es bajo para alto nivel de LO

- La impedancia en los puertos disminuye a medida que la potencia de LO aumenta

3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

3.4 Ganancia de Conversión

$$G_C = \frac{P_{IF}}{P_{RF}}$$



- P_{IF} : Potencia disipada en la carga de salida (a IF)
- P_{RF} : Potencia disponible desde la fuente (a RF)

- Para mezcladores a diodo: Ganancia será negativa

Pérdidas de Conversión

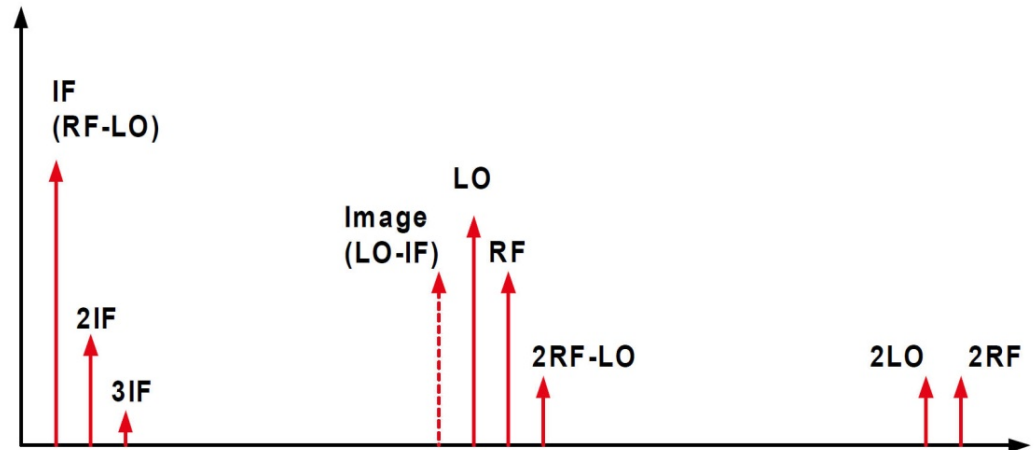


3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

3.5 Otras características

- “Frecuencia Imagen”

- $F_{\text{imagen}} = LO - IF$



- Es un posible problema de interferencia

- Puede incrementar la Figura de Ruido del receptor en 3 dB

- Para prevenir estos problemas:

- ✓ Filtro de rechazo de imagen en la entrada
 - ✓ Mezcladores de rechazo de frecuencia imagen (híbridos y mezcladores equilibrados)

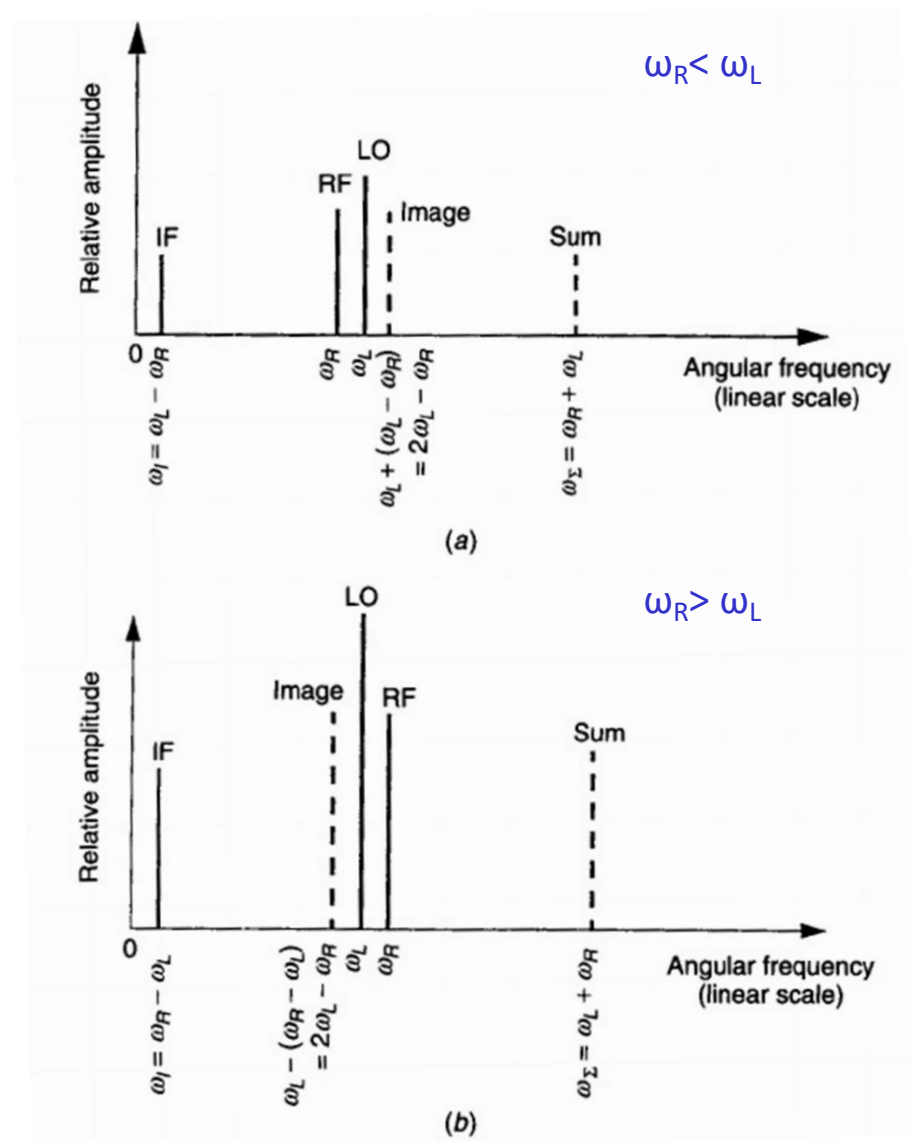
3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

- “Frecuencia Imagen”
- “Frecuencia suma”
- Algunas técnicas mejoran la conversión:
 - Recuperación de la imagen


$$\omega_L - \omega_{\text{imagen}} = \omega_L - (2\omega_L - \omega_R) = \omega_L - \omega_R = \omega_I$$

- Recuperación de la suma

$$\omega_\Sigma - 2\omega_L = \omega_R + 2\omega_L - 2\omega_L = \omega_R - \omega_L = \omega_I$$



3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

- “Distorsión por Intermodulación (IMD)”
 - Diodos Schottky son dispositivos no lineales
 -  Causan distorsión
 - La manifestación más habitual de la distorsión es IMD
 - Se generan productos de la mezcla entre armónicos de las señales de RF y OL
 - Los mezcladores equilibrados suprimen algunos productos
 - La manera más efectiva de reducir IMD es:
 - ✓ Cortocircuitar los diodos a frecuencia no deseadas
 - ✓ Alto nivel de LO
 - ✓ Mezcladores resistivos a FET presentan baja IMD

3. Teoría de Mezcladores a Diodo y Operación

- “Respuesta Espuria”

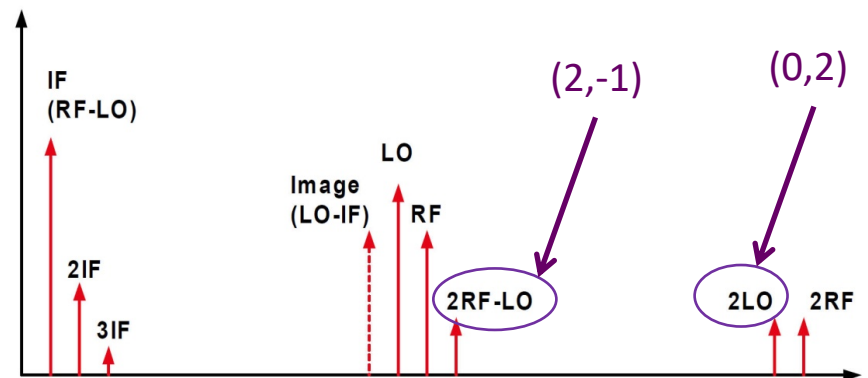
- Respuesta espuria es un producto de mezcla entre un armónico de RF y un armónico de LO
- La mayoría caen fuera de banda ó son débiles
- Pero ocasionalmente pueden caer en la banda :



- Interferencia

- Respuesta espuria → $f_{IF} = mf_{RF} + nf_{LO}$
m y n enteros

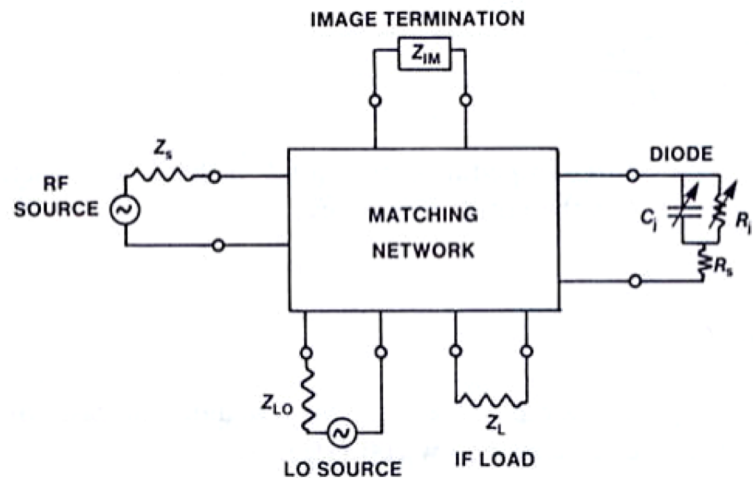
- Respuesta espuria (m,n)



4. Mezcladores a diodo

4.1 Consideraciones de Diseño

- El mayor problema de diseño es determinar la impedancias de entrada y salida del diodo.
- Diodo es no lineal $\rightarrow R_j$ y C_j varían con la potencia de OL
- R_j muestra una variación mucho mayor que C_j
- El circuito de adaptación de un mezclador a diodo debe separar las componentes de frecuencia importantes y presentar la impedancia adecuada al diodo a cada una de esas frecuencias.



- El problema central : encontrar C_j y R_{in} , R_{out}

4. Mezcladores a diodo

4.2 Selección del diodo

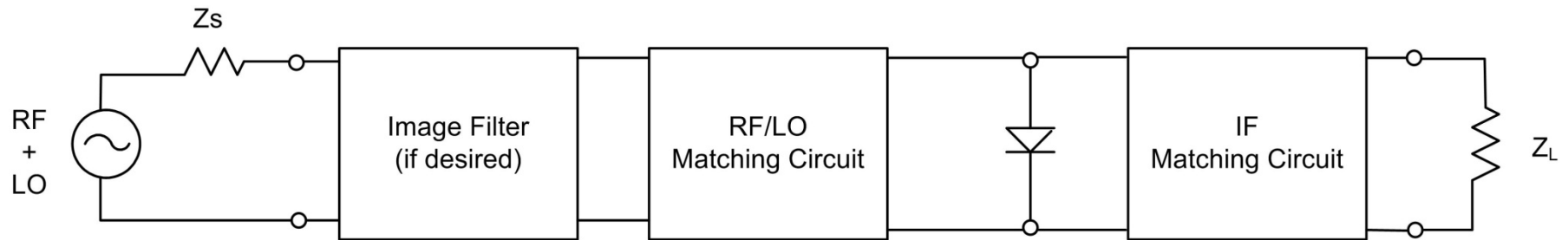
- Normalmente un compromiso entre :
 - Coste
 - Conveniencia
 - Facilidad en la fabricación
 - Comportamiento
- La mejor elección para un diodo: entre Si y GaAs
 - GaAs
 - » comportamiento superior en alta frecuencia
 - » alta resistencia a transitorios de tensión
 - » bajas pérdidas de conversión
 - Si
 - » Buena elección para baja frecuencia
 - » Aplicaciones de gran volumen, donde el coste es importante
 - » presentan menor altura de la barrera, requieren menor potencia de OL en mezcladores sin polarizar.

{ Alta frecuencia de corte
Alta tensión de breakdown

4. Mezcladores a diodo

4.3 Metodología de Diseño

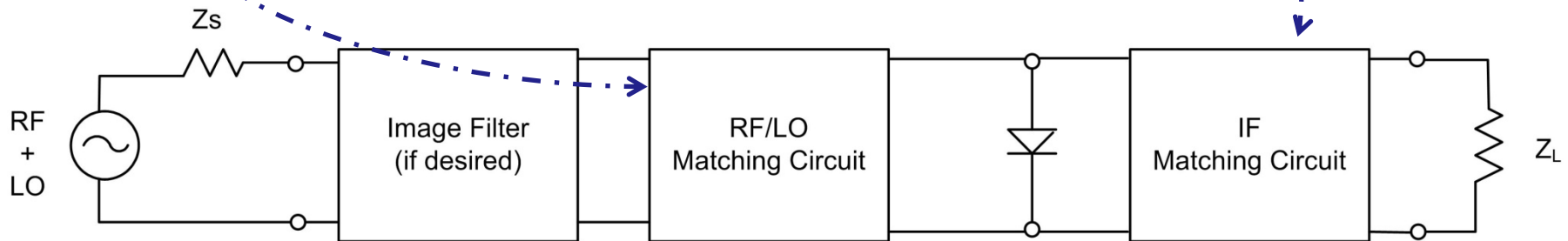
- Circuito equivalente de un mezclador a diodo



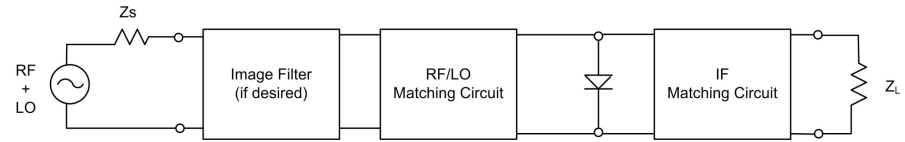
- RF y LO se aplican al mismo acceso del diodo (diplexor, ...)
- Circuito de IF físicamente separado del circuito de RF/LO
- Filtro imagen opcional en la entrada.

4. Mezcladores a diodo

- Proceso de diseño:
 - Estimar el valor de la impedancia de entrada a la frecuencia de RF
 - » Al ser el diodo un elemento no lineal, Z_{in} variará con la señal de OL
 - » En general, más fácil de adaptar a altos niveles de OL
 - Diseñar la red de adaptación (prioridad a RF). No debe afectar a IF
 - Diseñar la red de adaptación de IF
(tener en cuenta los aislamientos entre RF, OL e IF)



4. Mezcladores a diodo



- Proceso de diseño:
 - Una vez que el mezclador está perfilado, ajustar el valor de DC y de potencia de OL para optimizar el comportamiento.
 - Será necesario optimizar la redes de adaptación.
 - Añadir el filtro de frecuencia imagen si es necesario
(debe tener mínimas pérdidas a la señal de RF)
 - Simulación del circuito es esencial y se recurrirá a simulación electromagnética según la frecuencia de funcionamiento.
- Según la frecuencia de trabajo, el medio de transmisión puede variar: microstrip, guía de onda, stripline en substrato suspendido,...

4. Mezcladores a diodo

4.4 Ejemplo de diseño: Mezclador a diodo en banda C

- RF: 5.925-6.425 GHz, IF: 3.7-4.2 GHz
- LO: 2.225 GHz
- Diseñado en ADS

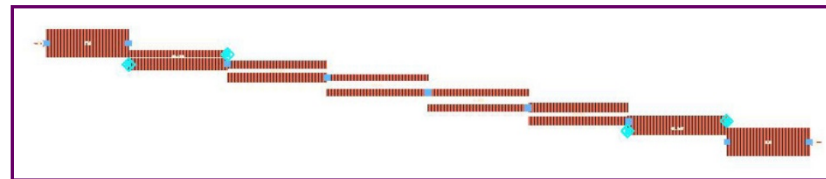
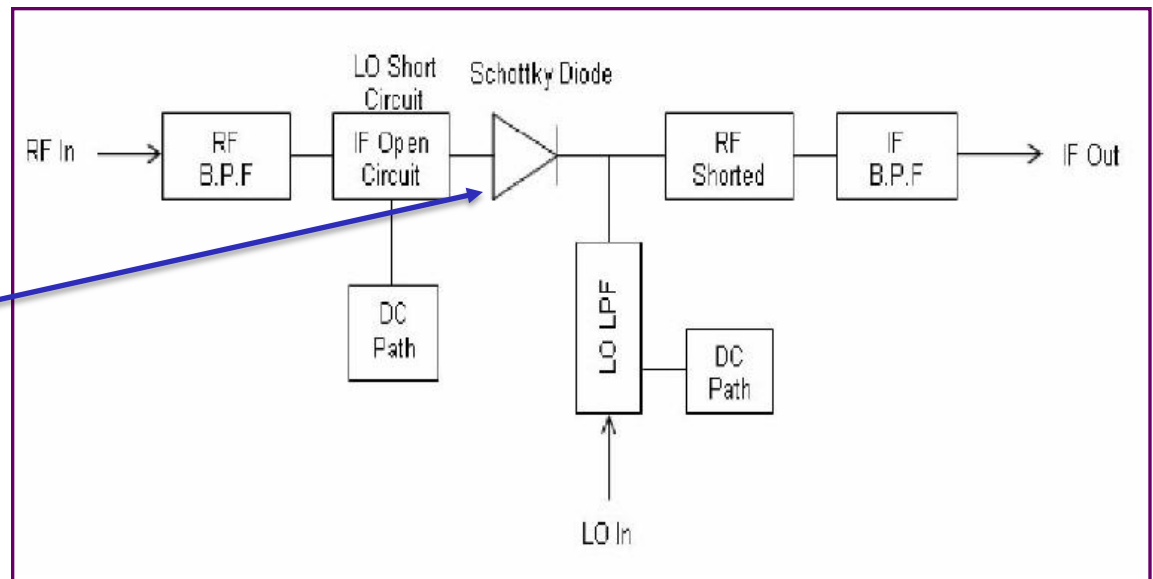
- *Dispositivo:*

- HSMS2850 (A.T.)

- *Filtro RF (paso banda)*

- $F_0=6.175$ GHz
- BW: 500 MHz
- Pérdidas: 1.5-2.5 dB
- Rechazo > 20 dB
- RL > 15 dB

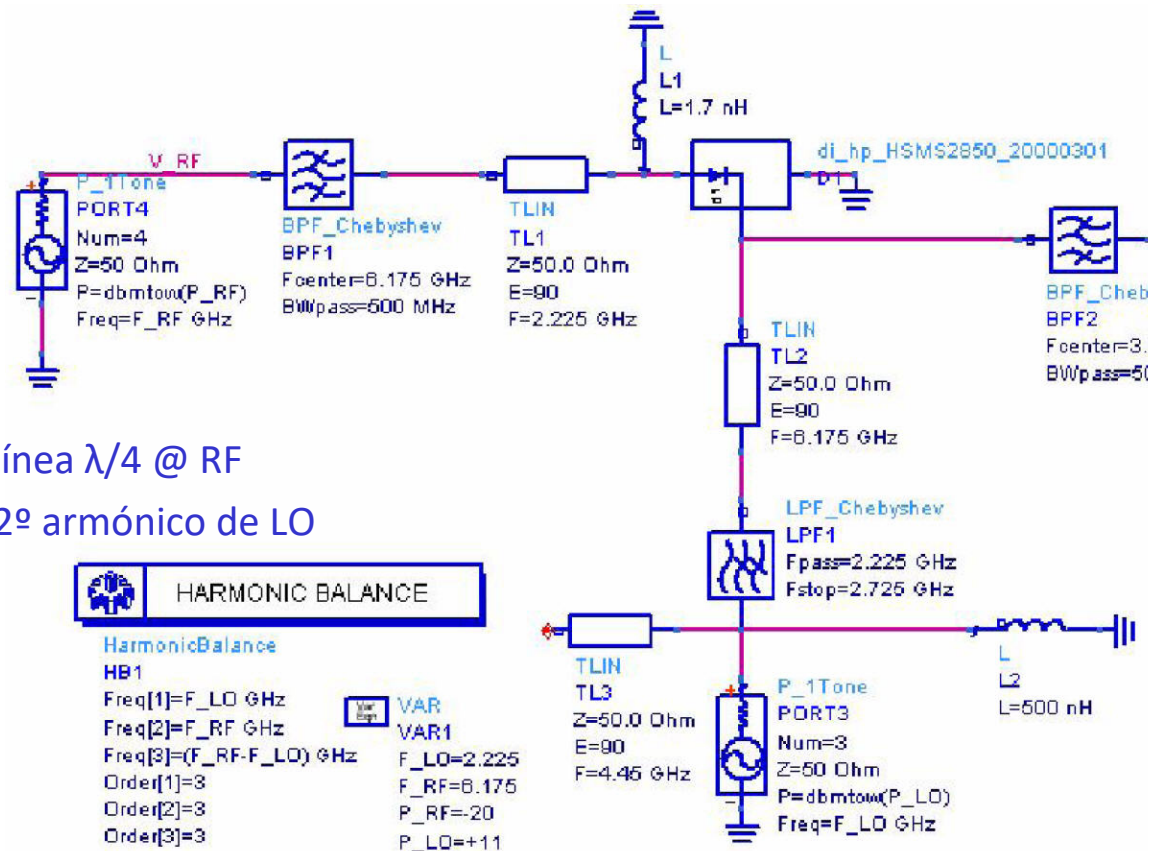
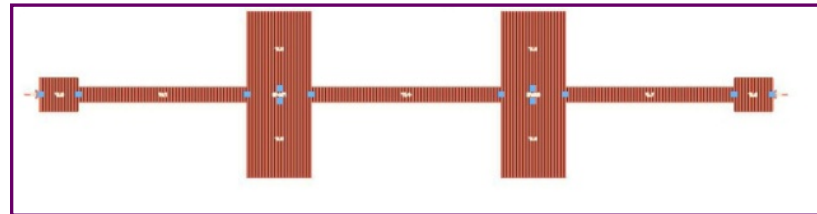
- Terminación resistiva con línea $\lambda/4$ @ LO (alta impedancia a IF)



4. Mezcladores a diodo

- *Filtro LO*

- $F_0=2.225$ GHz
- Pérdidas: 0.2-1 dB
- Rechazo > 20 dB @ 2.3 GHz
- RL > 20 dB

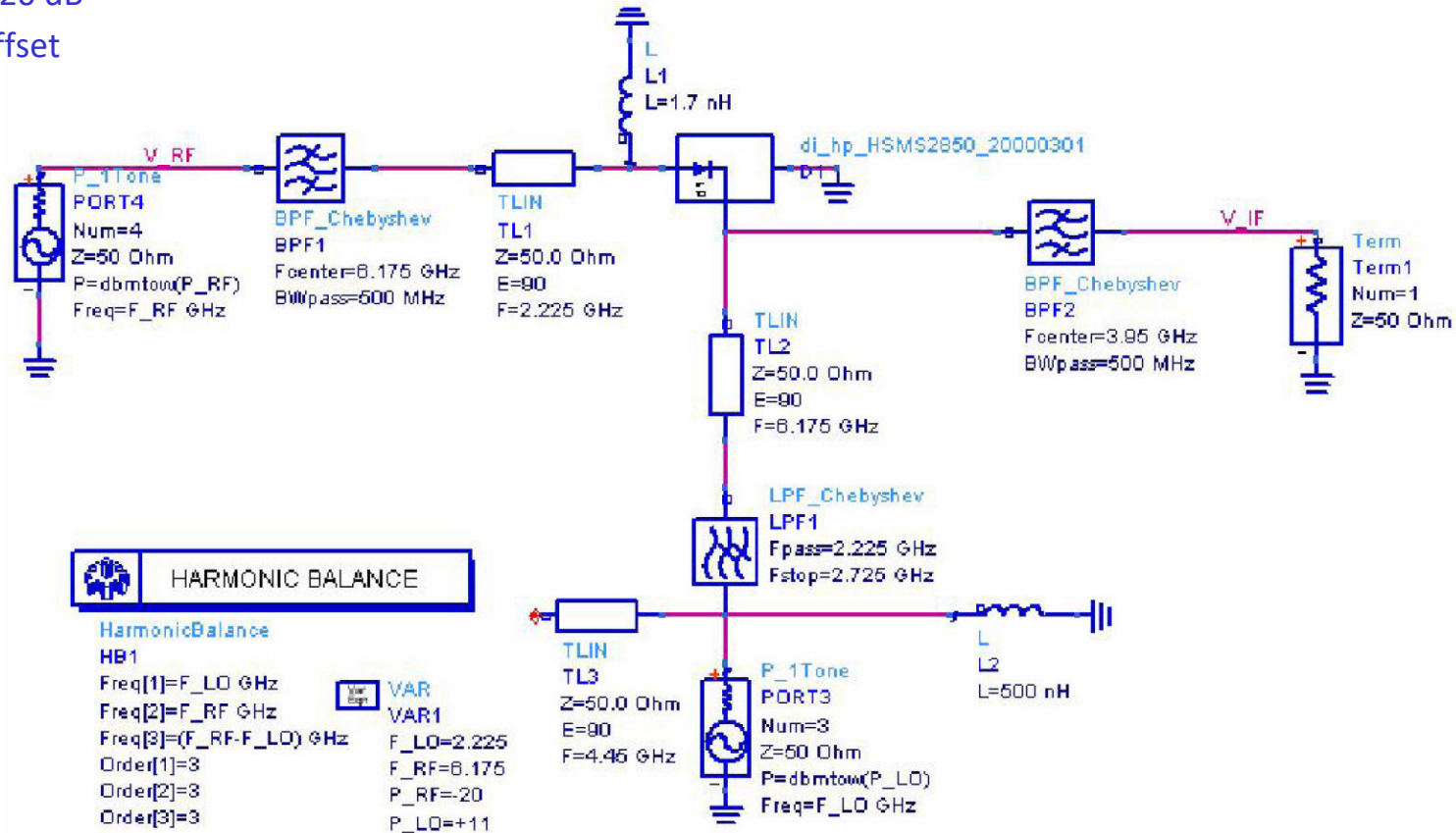
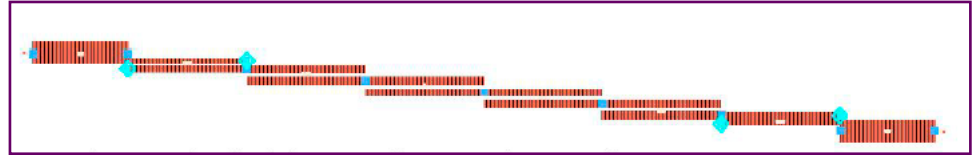


- Terminación resistiva con línea $\lambda/4$ @ RF
- Filtro notch para suprimir 2º armónico de LO

4. Mezcladores a diodo

- *Filtro IF (paso banda)*

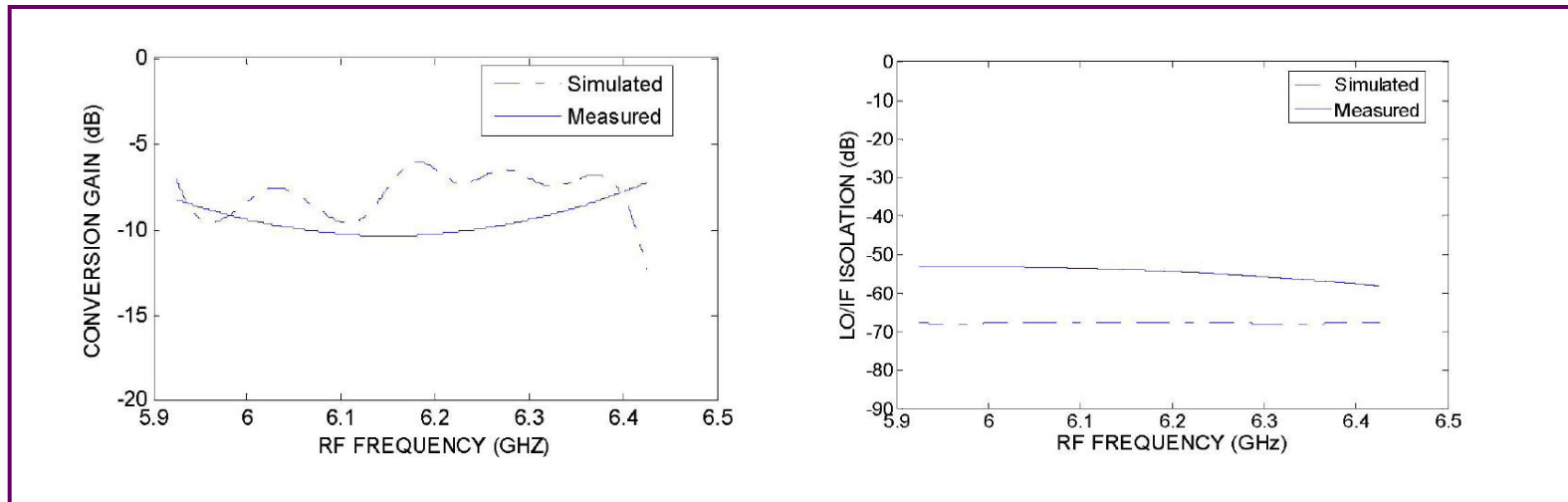
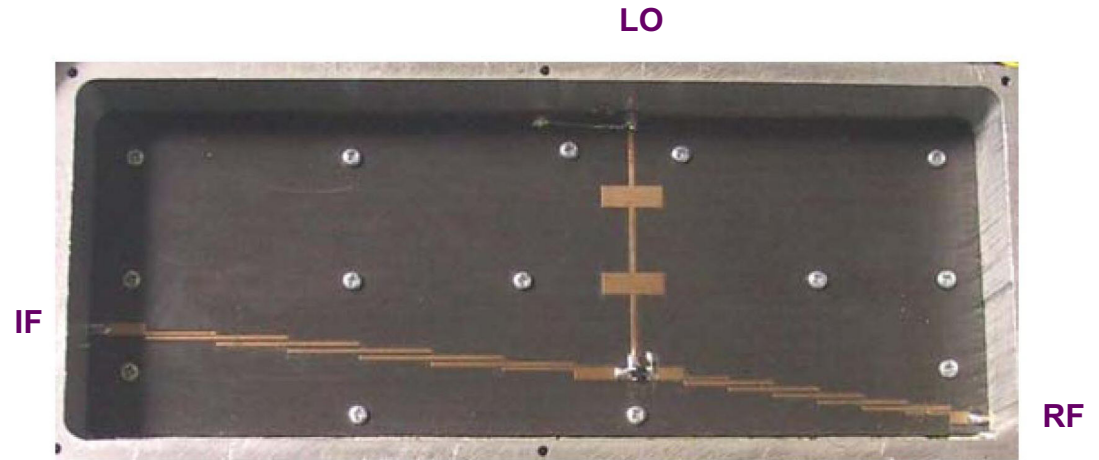
- $F_0=3.95$ GHz
- BW : 500 MHz
- RL > 15 dB
- Rechazo > 20 dB @ 100 MHz offset



4. Mezcladores a diodo

- *Fabricación y medida*

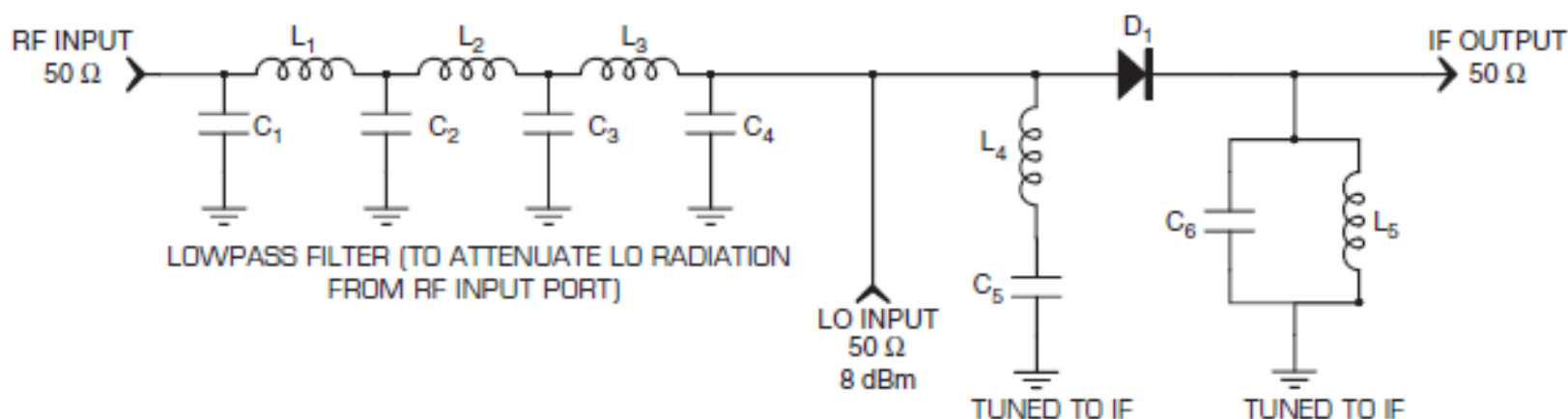
- Fabricado en Duroid
($\epsilon_r = 2.2$, $h = 0.787$ mm)



4. Mezcladores a diodo

4.5 Ejemplo de diseño: Mezclador a diodo

- Seleccionar un diodo apropiado según la banda de frecuencia de interés
- Diseñar L_4 y C_5 para una resonancia serie a FI
- Diseñar L_5 y C_6 para una resonancia paralela a FI
- Diseñar un filtro paso bajo a RF para atenuar el alto nivel de potencia de OL
- En baja frecuencia y para aplicaciones de bajo coste, no se suele adaptar. (Para valores altos de potencia de OL $\rightarrow Z_{in} \approx 50 \Omega$)



4. Mezcladores a diodo

4.5 Ejemplo de diseño: Mezclador a diodo

- Especificaciones:

f_{RF}	60 MHz
----------	--------

f_{OL}	100 MHz
----------	---------

f_{FI}	40 MHz
----------	--------

P_{LO}	+8 dBm
----------	--------

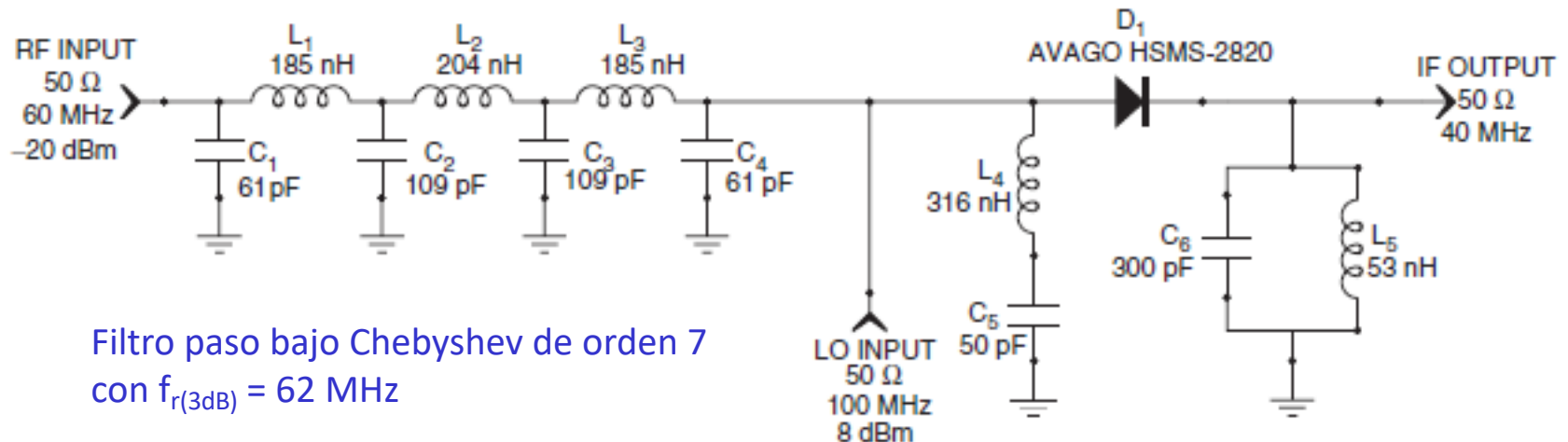
- Solución:

L_4	316 nH
-------	--------

L_5	53 nH
-------	-------

C_5	50 pF
-------	-------

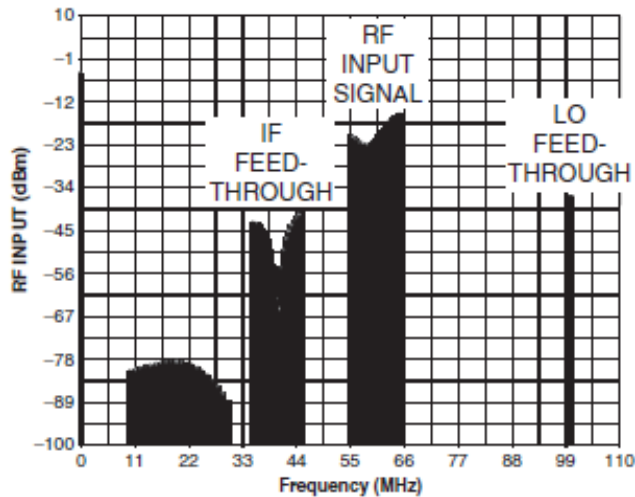
C_6	300 pF
-------	--------



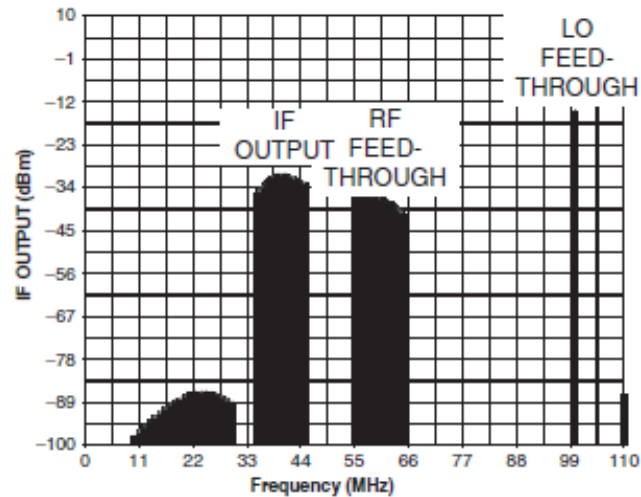
4. Mezcladores a diodo

4.5 Ejemplo de diseño: Mezclador a diodo

- $P_{out} = -30 \text{ dBm}$
- $G_c = -10 \text{ dB}$

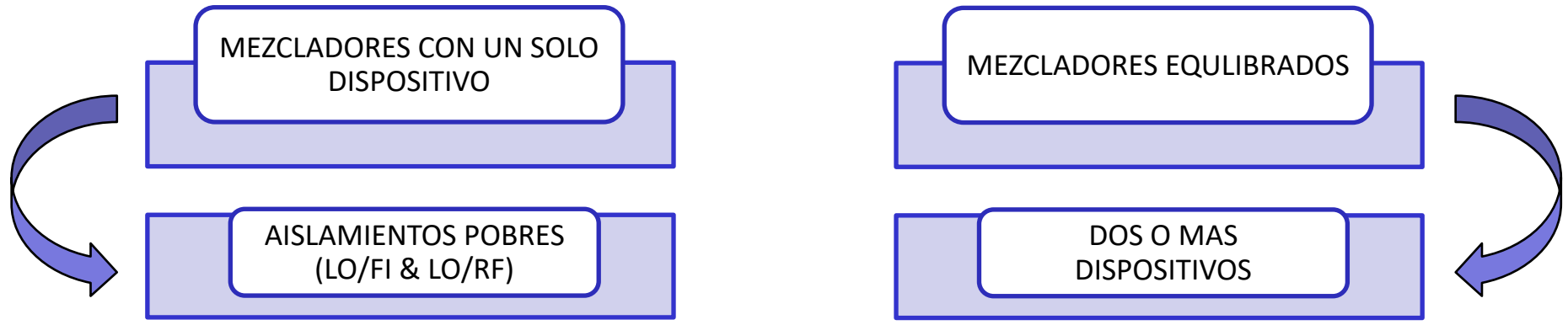


Señales presentes en el puerto de RF



Señales presentes en el puerto de salida de FI

5. Mezcladores equilibrados a diodo



Ventajas de los mezcladores equilibrados

- Buenos aislamientos
- Rechazan ciertos espurios
- Rechazan ruido de OL
- Rechazan señales espurias del OL
- Tienen mejor capacidad de potencia

Inconvenientes de los mezcladores equilibrados

- Peor comportamiento en la conversión por la dificultad de optimizar
- Mayor necesidad de potencia de OL
- Mayor número de dispositivos

5. Mezcladores equilibrados a diodo

- Siempre se pueden simplificar a un circuito de un solo dispositivo
- Generalmente el problema de diseño se divide en dos:

- Mezclador en sí
- Acoplador híbrido, circuito desfasador ...

- Tipos de mezcladores equilibrados:

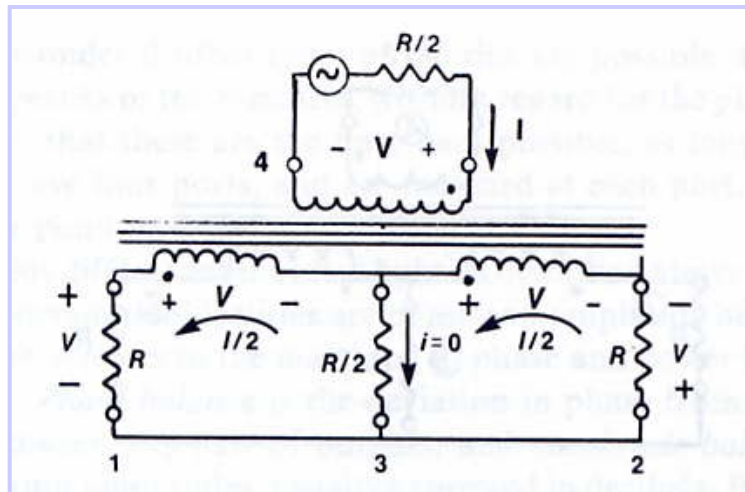
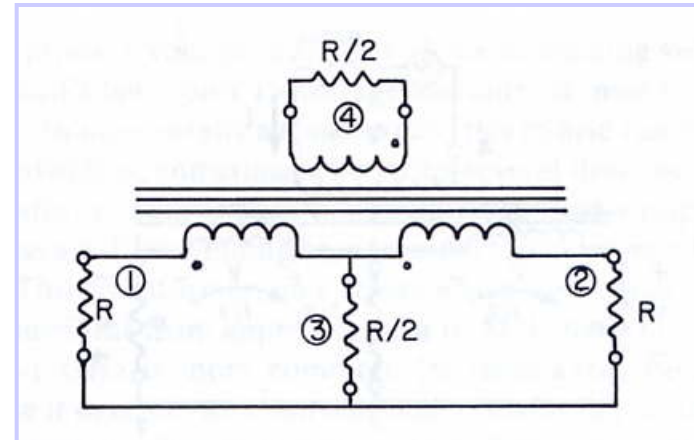
- Simplemente equilibrados (2 dispositivos) { Híbrido 180°
Híbrido 90°
- Doblemente equilibrados (4 dispositivos) { Anillo (Ring)
Estrella (Star)

5. Mezcladores equilibrados a diodo

5.1 Acopladores Híbridos

- Circuitos de 4 puertas, con todas ellas adaptadas a su fuente.
- Distintos tipos:
 - a. Transformador híbrido

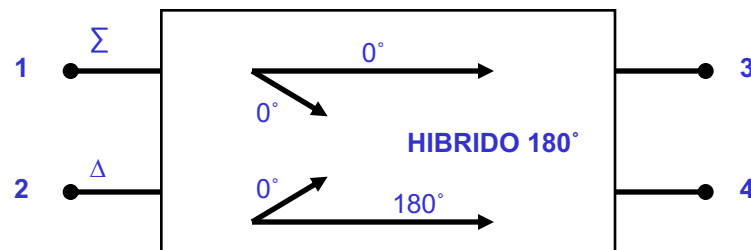
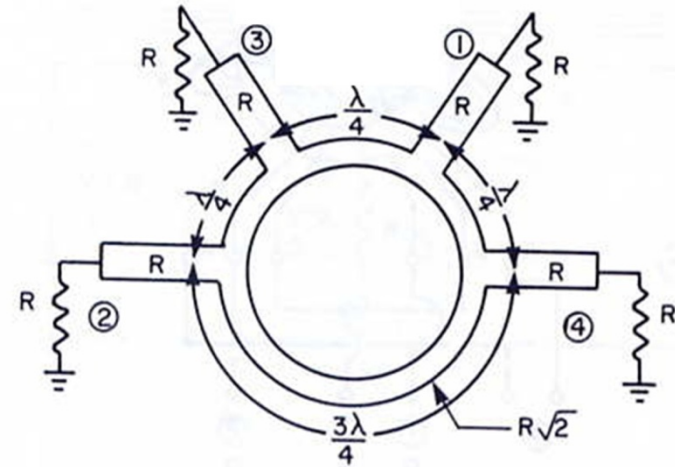
- $V_3=0$ Masa virtual (Aislada respecto 4)
- V aparece en 1 y 2 en oposición de fase
- $4 \rightarrow LO$ y $3 \rightarrow FI$



5. Mezcladores equilibrados a diodo

b. Anillo Híbrido – Ratrace (180°)

- 1 y 2 aisladas
- 3 y 4 aisladas
- $P_1 \begin{cases} P_3 = P_1/2 \\ P_4 = P_1/2 \end{cases}$
- $P_2 \begin{cases} P_3 = P_2/2 \\ P_4 = P_2/2 \end{cases}$

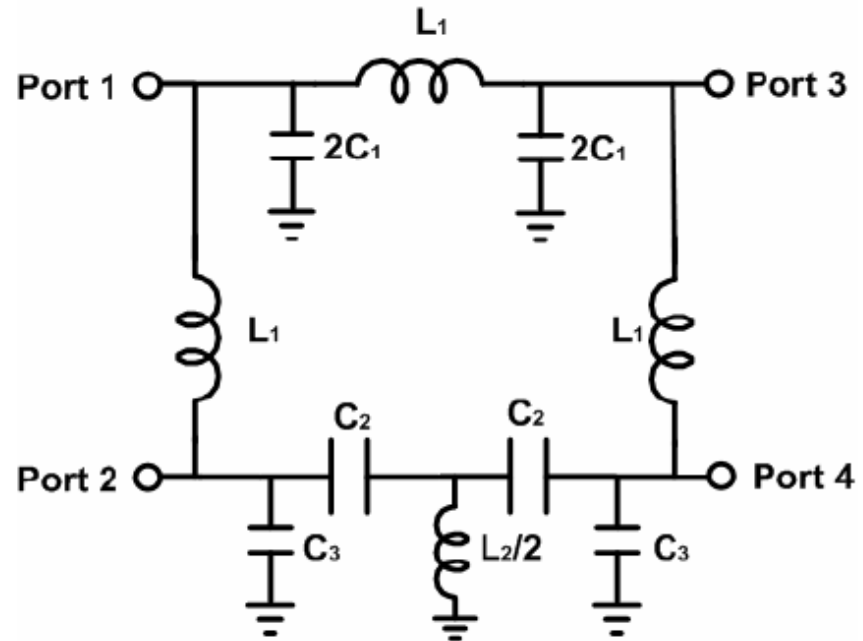


- Ancho de banda : 10-15 % (Banda estrecha)

5. Mezcladores equilibrados a diodo

b. Anillo Híbrido – Rat-race (180°) con elementos concentrados

- 1 y 4 aisladas
- 2 y 3 aisladas
- $P1 \begin{cases} P2 = P1/2 \\ P3 = P1/2 \end{cases}$
- $P2 \begin{cases} P1 = P2/2 \\ P4 = P2/2 \end{cases}$
- $P1 \rightarrow$ Puerta Σ
- $P2 \rightarrow$ Puerta Δ

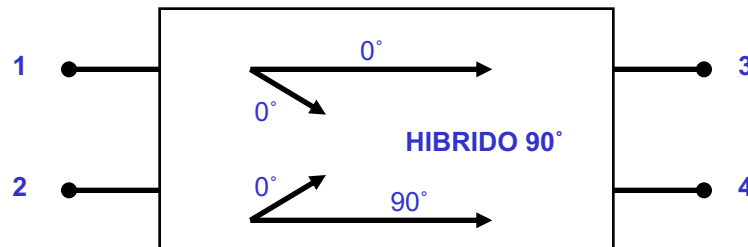
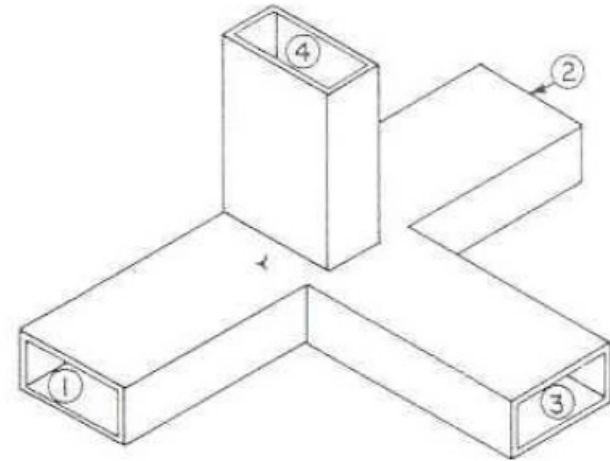


- Ancho de banda : 10-15 % (Banda estrecha)

5. Mezcladores equilibrados a diodo

c. TE Híbrida en Guía (Tee Mágica (180°))

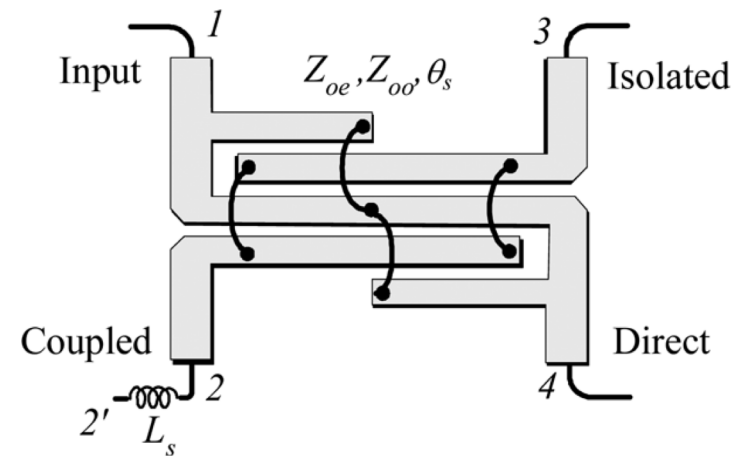
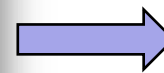
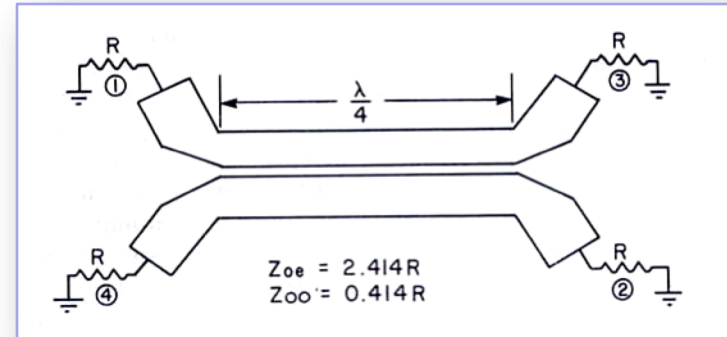
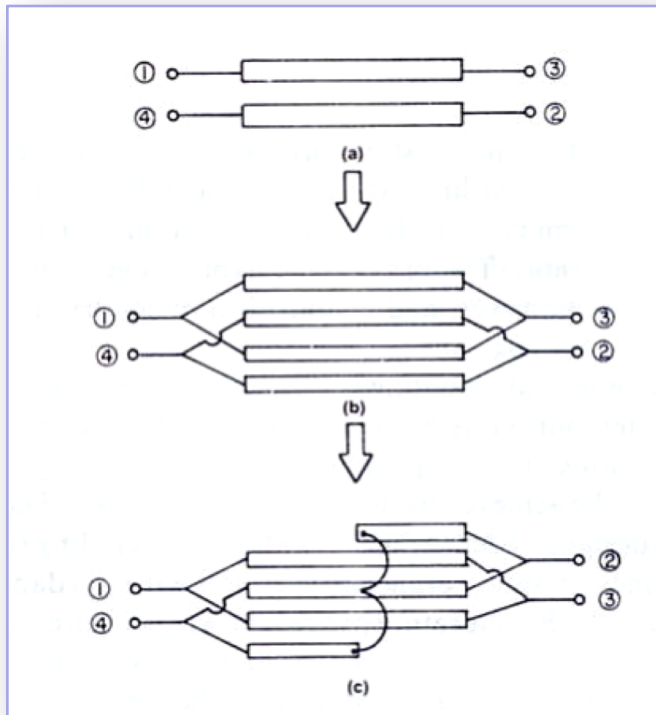
- 1 y 2 aisladas
- 3 y 4 aisladas
- El proceso de división es debido a la simetría de la unión y no a la longitud de caminos
- No tiene adaptación de puertas de forma natural (sintonizar con postes)
- Ancho de banda : 5-10 % (con postes)



5. Mezcladores equilibrados a diodo

d. Híbrido con Líneas Acopladas (90°)

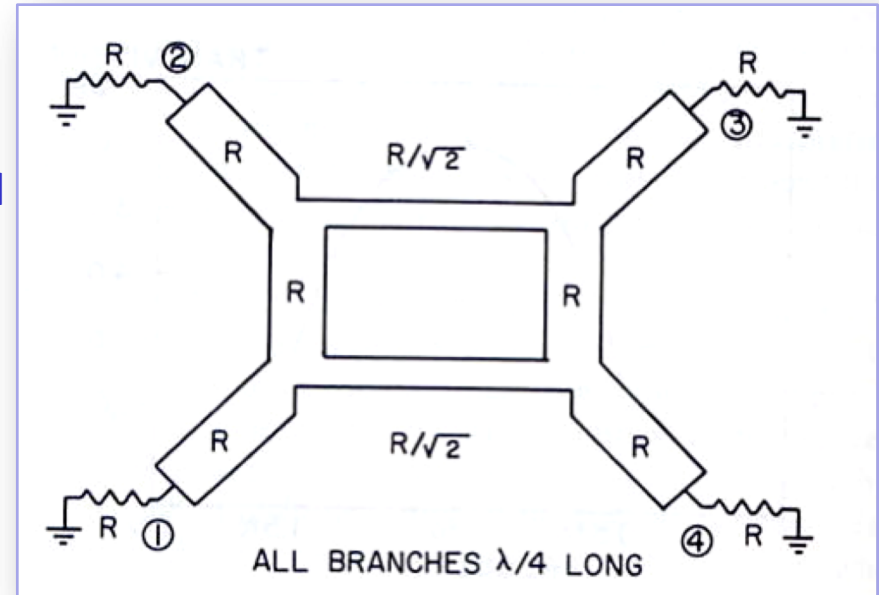
- Desfase 90°
- Reparte la potencia por igual
- BW pequeño
- A. Lange tiene mayor BW



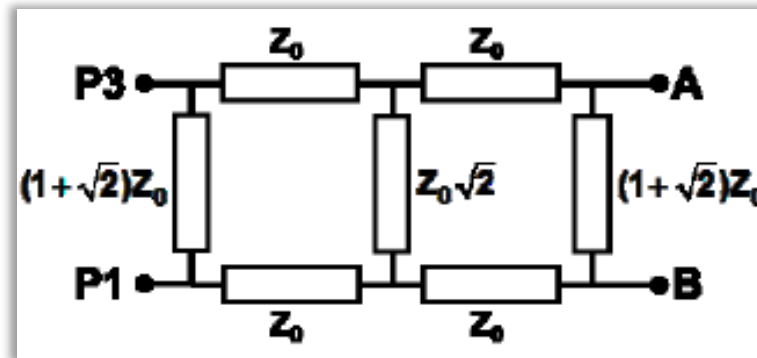
5. Mezcladores equilibrados a diodo

e. Híbrido Branch-Line (90°)

- Desfase 90°
- Reparte la potencia por igual
- BW pequeño



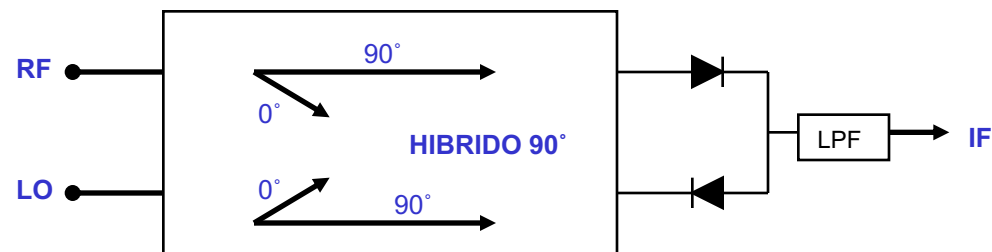
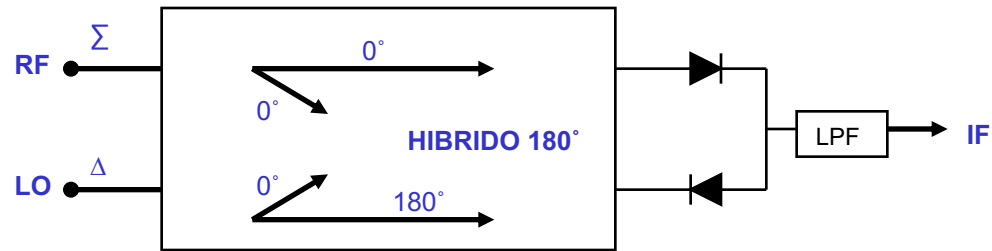
- Para mayor BW se pueden añadir más secciones



5. Mezcladores equilibrados a diodo

5.2 Mezcladores Simplemente Equilibrados

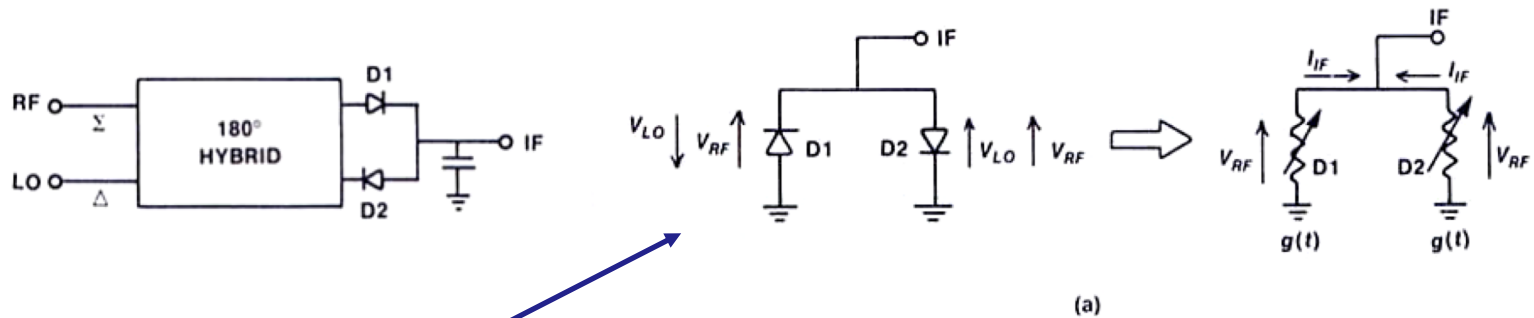
- Consiste en dos mezcladores simples a diodo, conectadas a dos puertos aislados del híbrido.
- Las puertos de IF se suelen conectar en paralelo



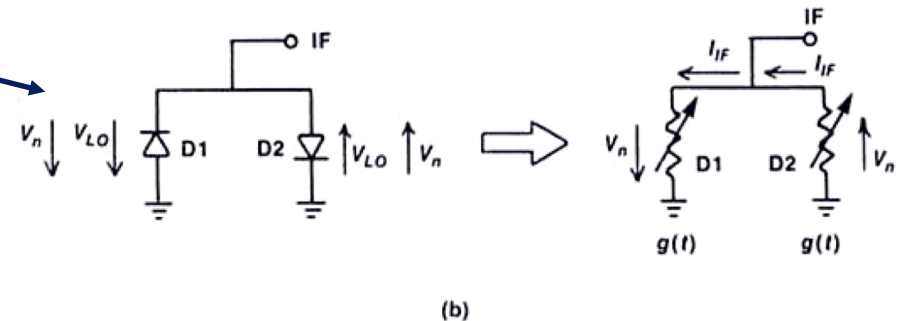
5. Mezcladores equilibrados a diodo

Detalles a tener en cuenta:

- Orientación de los diodos y fases de RF/LO
- Propiedades de rechazo de ruido AM de LO
- Rechazo a respuestas espurias
- Aislamiento RF/LO
- Mezclador equivalente a diodo simple

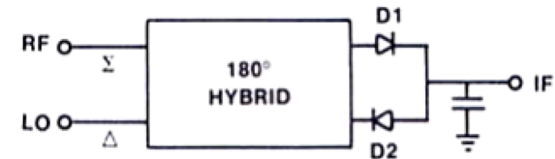


- (a) operación normal
- (b) operación para ruido AM



5. Mezcladores equilibrados a diodo

5.2.2 Mezcladores Híbridos 180°

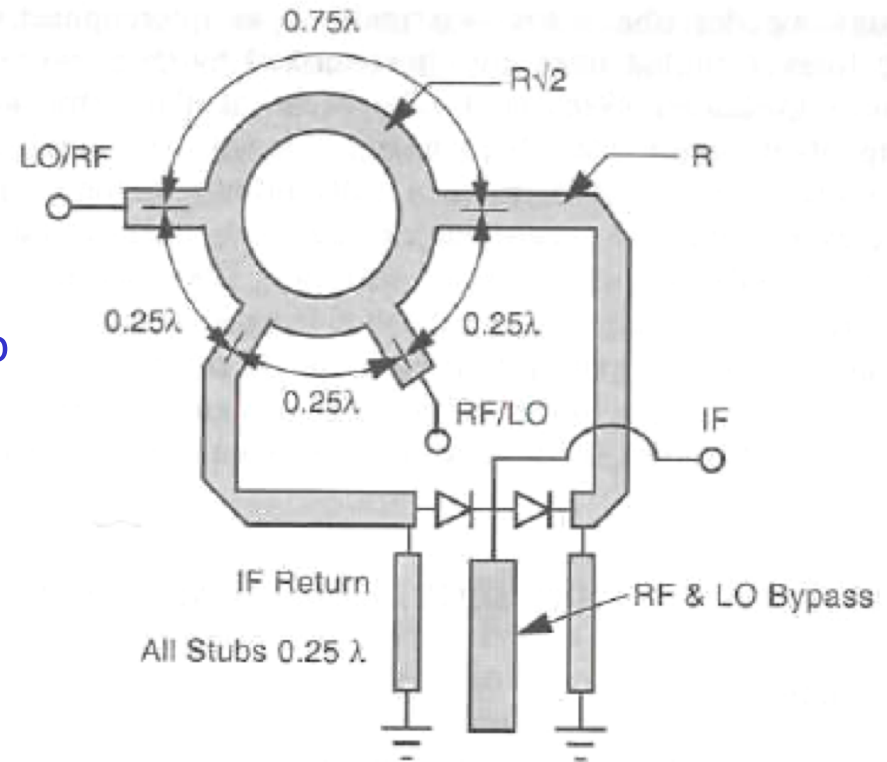


- LO aplicado a la puerta Δ y RF a la puerta Σ
- V_{LO} desfasado 180° en los dos diodos
- Las formas de onda de la conductancia (bajo excitación LO) no lineal están en fase (diodos están en oposición).
- $i(t)=g(t)\cdot v(t)$
- El voltaje de RF está en fase en los diodos. Las corrientes IF se suman en el nudo de unión de los diodos → Mezcla
- El ruido AM debido al LO se cancela completamente (V_n y V_{LO} van en fase a los diodos).
 - Se eliminan las respuestas espurias $\pm m \pm n$ (m, n par) junto con (2,1).
 - No se elimina la respuesta (1,2)
- Si se intercambia LO y RF, el mezclador tendrá las mismas pérdidas de conversión, el mismo rechazo al ruido del LO. Se elimina la respuesta (1,2) y no la (2,1).

5. Mezcladores equilibrados a diodo

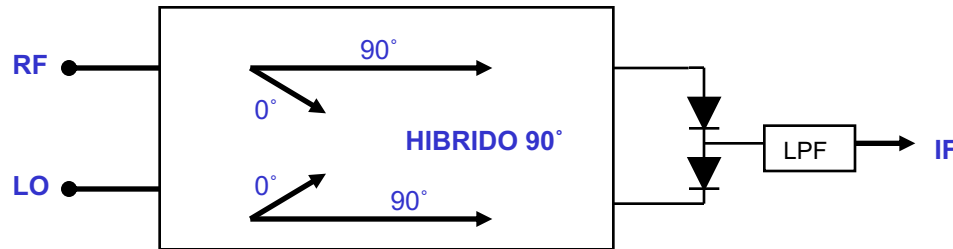
Ejemplo: Anillo híbrido: Rat-Race

- Anillo híbrido (Rat-Race) es un tipo de híbrido 180°
- Facilidad para aplicar DC y sintonizar los diodos
bajas pérdidas



5. Mezcladores equilibrados a diodo

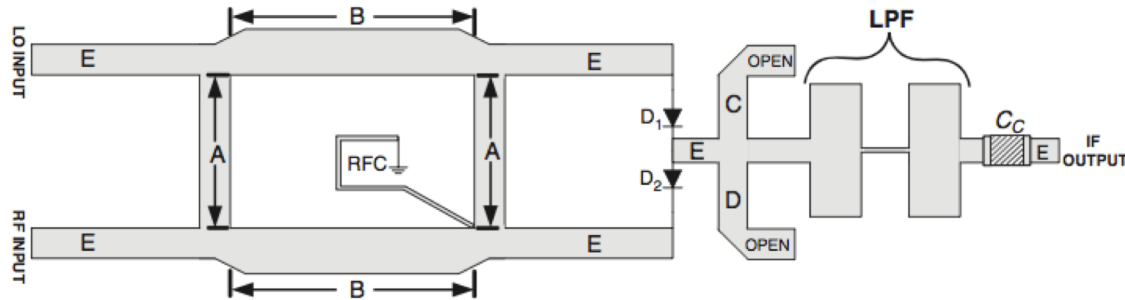
5.2.2 Mezcladores Híbridos 90°



- RF y LO en puertas aisladas
- Si el híbrido ve 50 Ohm hacia los diodos, el aislamiento perfecto entre RF y LO
- Adaptación y aislamiento dependientes de la adaptación de los diodos
- Es un verdadero equilibrado, eliminando el ruido del LO
- Elimina los espurios (2,2)
- No elimina los espurios (2,1) ó (1,2)

5. Mezcladores equilibrados a diodo

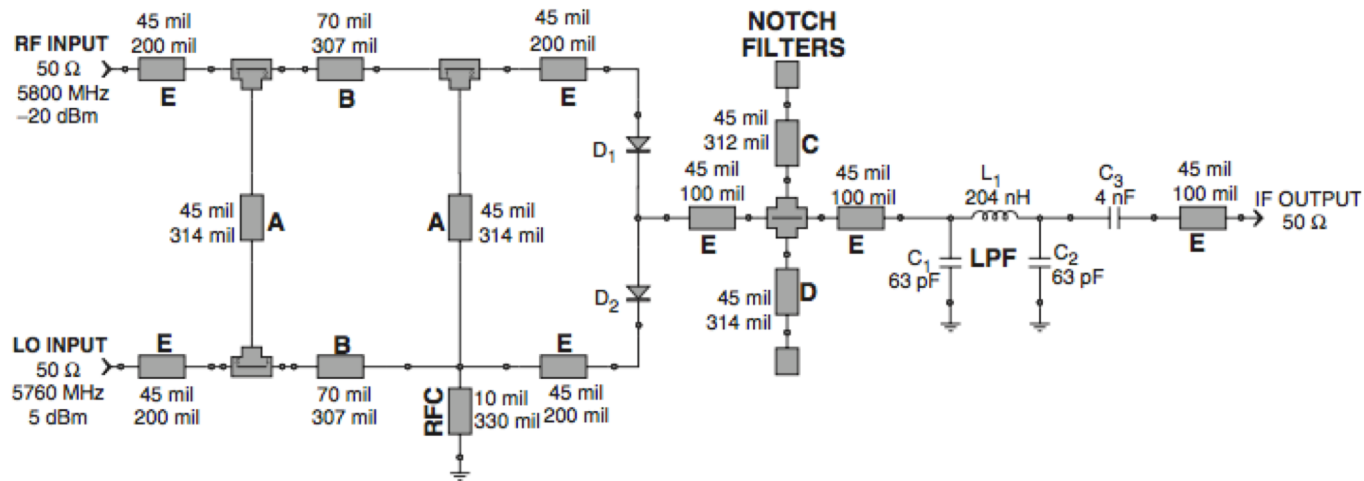
5.2.2 Mezcladores Híbridos 90°: ejemplo de diseño



- A: longitud 90° a f_{LO} ó $(f_{RF} + f_{LO})/2$ con una línea microstrip $Z_c=50 \Omega$
- B: longitud 90° a f_{LO} ó $(f_{RF} + f_{LO})/2$ con una línea microstrip $Z_c=35.5 \Omega$
- C: longitud 90° a f_{RF} con una línea microstrip $Z_c=50 \Omega$
- D: longitud 90° a f_{LO} con una línea microstrip $Z_c=50 \Omega$
- E: línea microstrip $Z_c=50 \Omega$
- RFC: longitud 90° a f_{LO} con una línea microstrip $Z_c=100 \Omega$
- D1 y D2= seleccionar los diodos Schottky apropiados según la banda de operación

5. Mezcladores equilibrados a diodo

5.2.2 Diseño de un Mezclador equilibrado a diodo:



- Especificaciones:
 - $f_{RF}=5.8$ GHz
 - $f_{LO}= 5.76$ GHz
 - $f_{IF}= 40$ MHz
 - $P_{LO}= +5$ dBm
 - $P_{out}= -5$ dBm
 - Pérdidas de conversión = -6 dB
 - Diodos: Avago HSMS-2820
 - Substrato: Roger's RO-4003, h= 20 mils

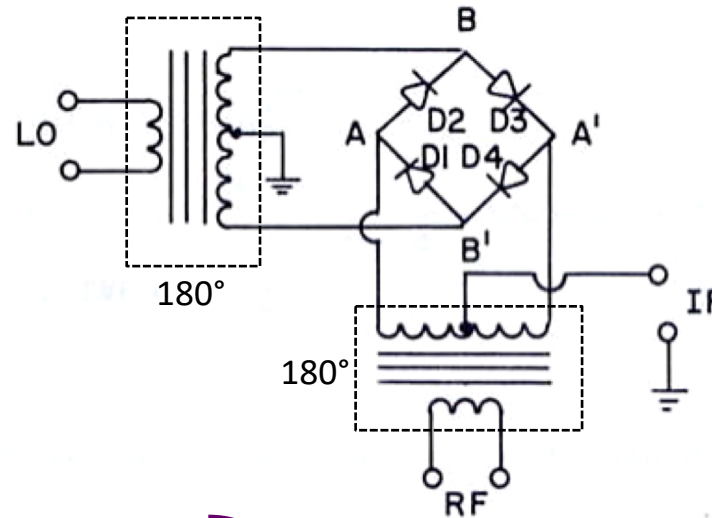
5. Mezcladores equilibrados a diodo

5.3 Mezcladores Doblemente Equilibrados

- Los más habituales :Anillo (Ring) y Estrella (Star)
 - Ventajas:
 - » Aislamiento inherente entre todas las puertas sin necesidad de filtros
 - » Eliminación de ruido del LO
 - » Eliminación de todos los espúreos
 - » Muy banda ancha
 - Inconvenientes:
 - » Se necesitan al menos 4 diodos y dos híbridos
 - » Mayor requerimiento de potencia de LO
 - » Mayores pérdidas de conversión

5. Mezcladores equilibrados a diodo

- 5.3.1 Mezclador en Anillo (RING)



- AA' : masa virtual para LO

- BB' : masa virtual para RF

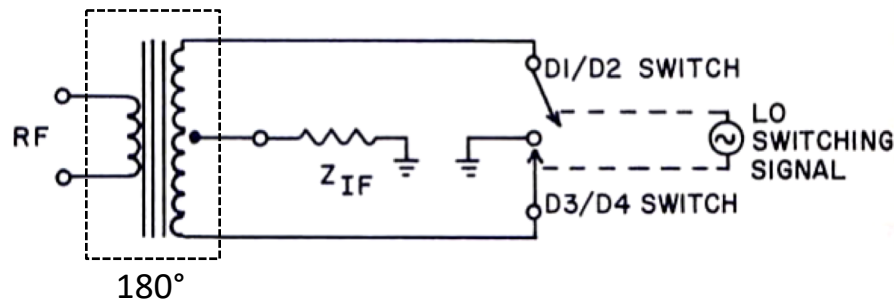
} Aislamiento perfecto LO/RF

- Para examinar el circuito respecto de LO → podemos eliminar el trans. RF

- Para examinar el circuito respecto de RF → podemos eliminar el trans. LO

5. Mezcladores equilibrados a diodo

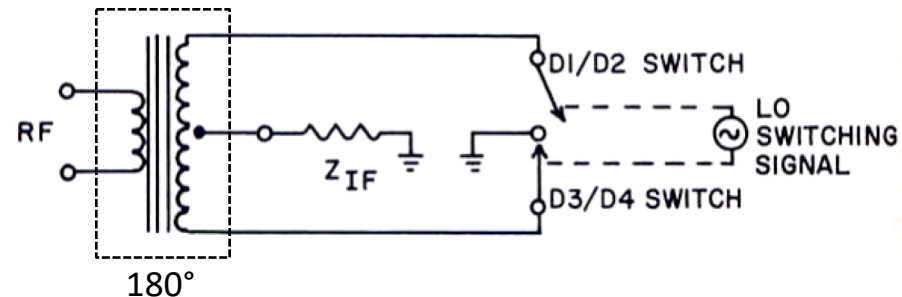
- Para explicar el funcionamiento, se supone que la forma de onda de $g(t)$ es una onda cuadrada.
- Señal de LO en BB' : $B(+)$ y $B'(-)$
 - D3 y D4 ON \rightarrow corto circuito
 - D1 y D2 OFF \rightarrow circuito abierto



- Si la unión y resistencia serie de D3 y D4 es baja, A' se puede aproximar a un corto, el nudo A' se conecta a masa virtual de RF en BB' \rightarrow se une a masa.
- A está en quasi-circuito abierto \rightarrow la mitad del secundario de RF está abierta \rightarrow conectada al terminador de FI.
- En el otro medio ciclo del LO, D1 y D2 están en ON, y es el otro secundario de RF el que está conectado a FI.

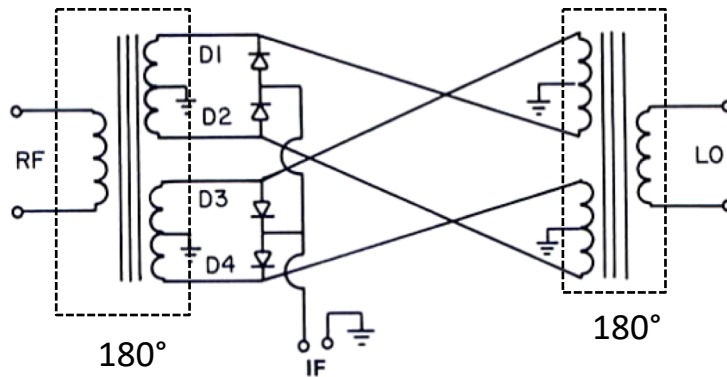
5. Mezcladores equilibrados a diodo

- El voltaje aplicado a Z_{IF} varía alternativamente de polaridad a la frecuencia de LO. → Equivalente a multiplicar la señal de RF por una onda cuadrada de frecuencia LO.
- La conversión de frecuencia ocurre a través del producto de la señal RF con la componente fundamental del desarrollo de FOURIER de la onda cuadrada.
- Incluso si los diodos no operan exactamente como llaves y la forma de onda de la conductancia no es precisamente una onda cuadra, sigue teniendo simetría de media onda de LO, por lo que no tiene componentes armónicos pares de LO



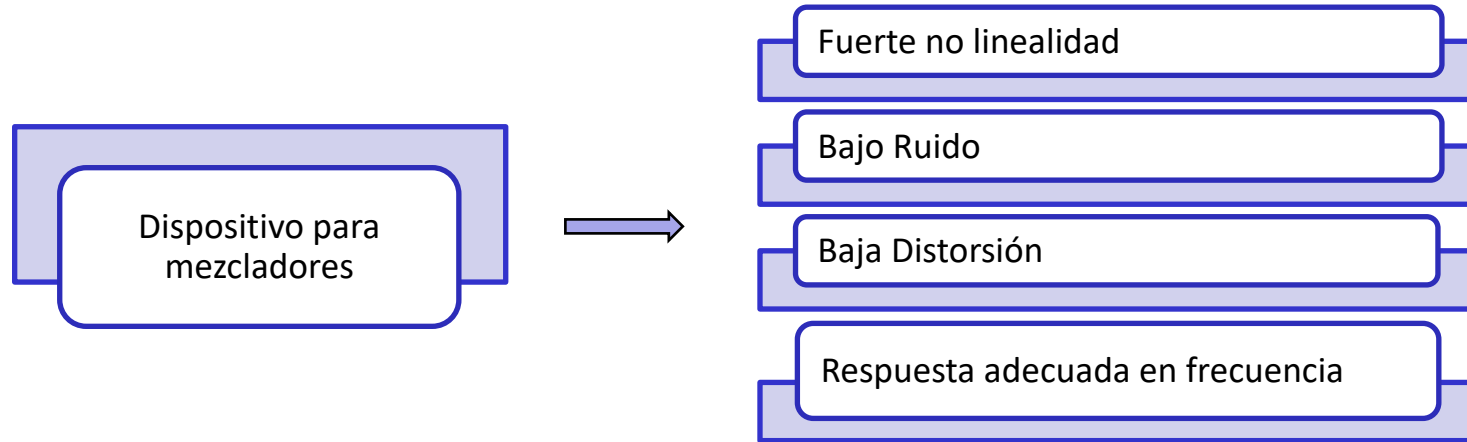
5. Mezcladores equilibrados a diodo

- 5.3.2 Mezclador en Estrella (STAR)
- En esencia es el dual del mezclador en anillo



- Los diodos tienen un extremo conectado a un nudo común usado como IF y los otros terminales conectados a transformadores de múltiple secundario.
- Con LO, los pares (D1, D3) y (D2, D4) conmutan ON/OFF.
- El efecto del cambio es idéntico al del mezclador en anillo.
- Requiere un transformador más complicado → menor BW y mayores pérdidas de conversión.

6. Mezcladores activos



- Los transistores FET se hicieron muy populares en los años 80 y 90 del siglo pasado.
- Principalmente:
 - Ganancia de conversión
 - Compatibilidad con los procesos monolíticos
 - Menor necesidad de potencia de LO
 - Mayor capacidad de potencia
- Posibilidad de realizar mezcladores equilibrados → características similares a las obtenidas con los mezcladores a diodo.

↳ algunos inconvenientes en estructuras equilibradas

6. Mezcladores activos

Mezcladores a FET
(un solo dispositivo)

Sencillos, baratos.
Ganancia de conversión, bajo ruido, poca distorsión.
Aislamientos pobres (OL/FI)

Mezcladores simplemente equilibrados a FET
(dos dispositivos)

Características similares a los que tienen 1 dispositivo, buenos aislamientos OL/FI & LO/RF
Requieren más potencia de OL y tienen IP3 mejores

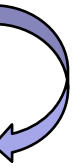
Mezcladores doblemente equilibrados a FET
(4 ó más dispositivos)

Mismas características que el mezclador con 1 dispositivo, pero todas las ventajas de un mezclador doblemente equilibrado. 6 dB más de potencia de OL.

6. Mezcladores activos

6.1 Teoría de Mezcladores a FET

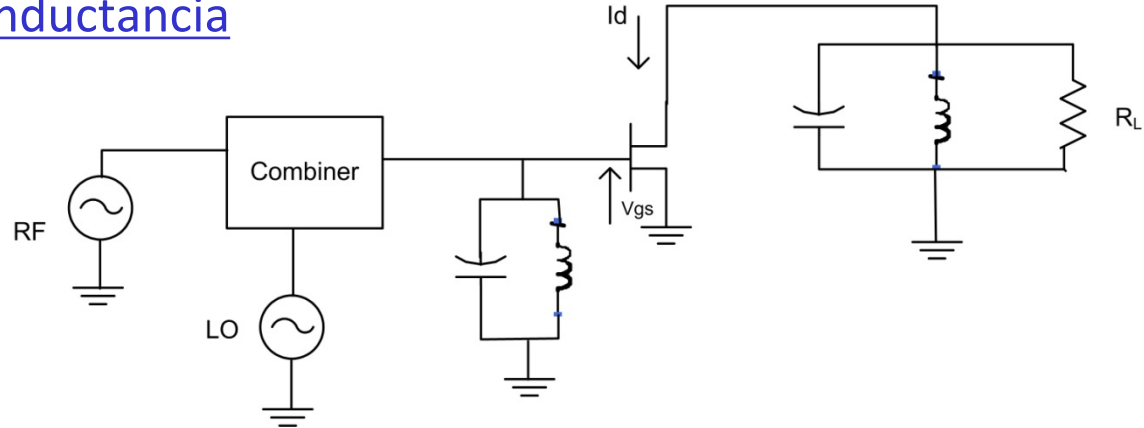
- La señal de LO se aplica entre los terminales de puerta y fuente (ó base y emisor)
- Se utiliza la señal de LO para variar la transconductancia (g_m)
- La conversión de frecuencia es debida a esa variación con el tiempo de la transconductancia : $g_m(t)$
“mezcladores a transconductancia”
- El transistor tiene otros elementos no lineales útiles para mezcladores
- Las mejores prestaciones se consiguen con inyección de LO por puerta
- Nos centraremos aquí en mezcladores a FET
- Con dispositivos bipolares, la extensión de la teoría es directa



6. Mezcladores activos

6.1.1 Mezcladores a transconductancia

- LO y RF por puerta
- $LO \rightarrow g_m(t)$
- RF se mezcla con $g_m(t)$



- La corriente de pequeña señal : $i_d(t) = G_m(t)v_g(t)$
 $G_m(t)$ forma de onda de la transconductancia
 $v_g(t)$ es la tensión de puerta
- $G_m(t)$ es periódica y en forma de serie de Fourier:

$$G_m(t) = G_{m0} + G_{m1} \cos(\omega_p t) + G_{m2} \cos(2\omega_p t) + G_{m3} \cos(3\omega_p t) + \dots$$

ω_p es la frecuencia de LO

6. Mezcladores activos

- Si se sustituye la señal de RF: $v_g(t) = V_s \cos(\omega_s t)$

$$i_d(t) = G_{m0} V_s \cos(\omega_s t) + \frac{G_{m1} V_s}{2} \left[\cos[(\omega_s - \omega_p)t] + \cos[(\omega_s + \omega_p)t] \right] +$$
$$\frac{G_{m2} V_s}{2} \left[\cos[(\omega_s - 2\omega_p)t] + \cos[(\omega_s + 2\omega_p)t] \right] + \dots$$

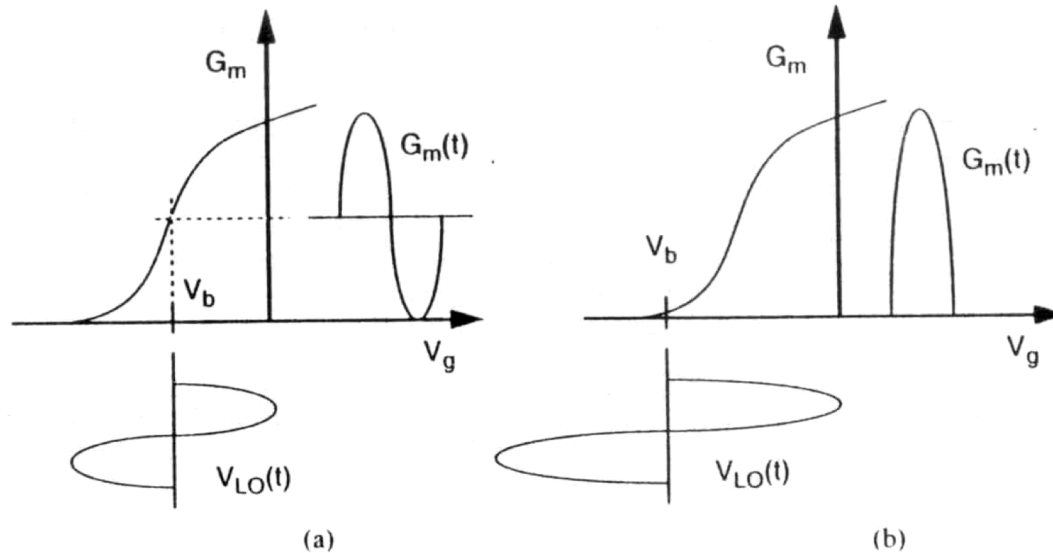
- La señal deseada $\omega_s - \omega_p$
- El resto debe ser eliminado
- La única componente de g_m que afecta a la salida es g_{m1}
- Para maximizar la corriente de IF



- Debemos maximizar la componente fundamental de $G_m(t)$

6. Mezcladores activos

- Para maximizar la corriente de IF $\rightarrow g_{m1}$ debe ser maximizado
- Para todos los FETs, $G_m(t)$ es máxima cuando opera en corriente de saturación



- (a) FET polarizado en zona activa
(b) FET polarizado cerca del pinch-off

6. Mezcladores activos

Metodología de diseño para mezcladores a transconductancia:

1. Polarizar el dispositivo próximo al pinch-off
2. Inyectar suficiente potencia de OL tal que la tensión de pico en la puerta proporcione la máxima transconductancia
3. Mantener el FET en saturación durante todo el ciclo de OL



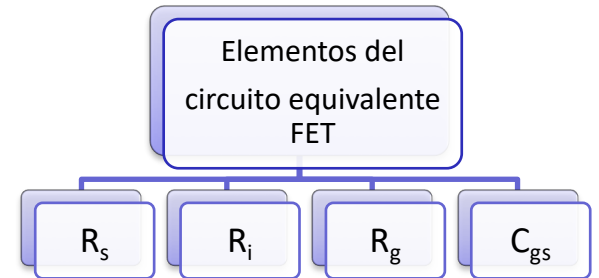
- Cortocircuitar el drenador a todos los armónicos de OL, incluyendo el fundamental
- Proveer suficiente potencia de LO
- Adaptación conjugada @ f_{LO}

6. Mezcladores activos

Adaptación de RF & LO:

- Para minimizar pérdidas → adaptación conjugada @ f_{RF}
- Si el drenador está cortocircuitado @ f_{LO} :

$$Z_{in} = R_s + R_i + R_g + \frac{1}{\omega_p C_{gs}}$$



- No suele ser posible adaptar ambas bandas de frecuencia, → más conveniente adaptar a RF y sufrir pérdidas a LO
- En baja frecuencia → Inductancia en serie con un transformador

6. Mezcladores activos

Terminación de IF en puerta

- Cortocircuitar la puerta del transistor para evitar que el circuito funcione en modo “amplificador”
- Término de DC de $G_m(t) \rightarrow G_{m0}$
 - Amplificación a f_{RF} $G_{m0}V_s \cos(\omega_s t)$
 - Amplificación a f_{IF}
- Cuando IF es baja \rightarrow ganancia elevada en bajas frecuencias
- Ruido @ f_{IF} puede ser amplificado \rightarrow Degradación Figura de Ruido
- Realimentación a f_{IF} \rightarrow Inestabilidad

6. Mezcladores activos

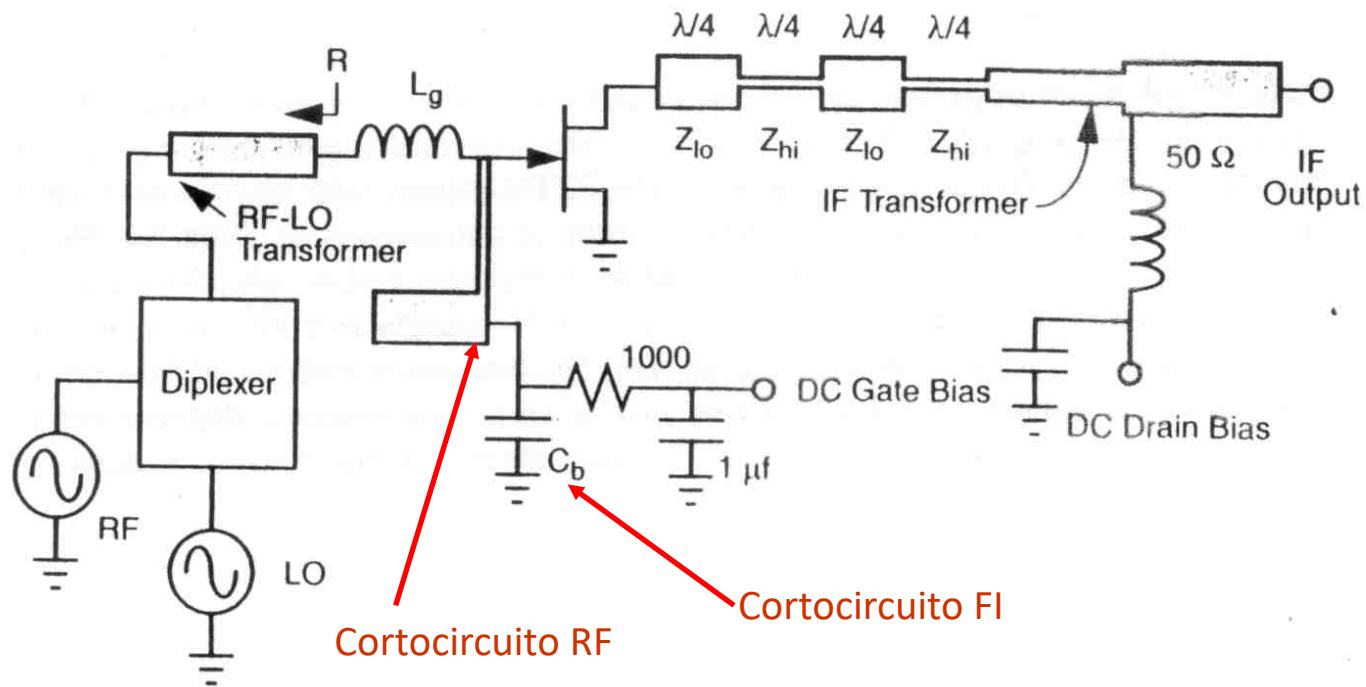
6.1.2 Eficiencia en la Conversión

- La ganancia de conversión $\rightarrow G_c = \frac{G_{m,\max}^2 R_L}{16\omega^2 C_{gs}^2 (R_s + R_g + R_i)}$
 - $G_{m,\max}$ es la transconductancia pico
 - R_L es la resistencia de carga de IF
 - Se supone $\left\{ \begin{array}{l} 1. \text{ Adaptación conjugada en puerta} \\ 2. \text{ Polarizado en pinch-off} \end{array} \right.$

6. Mezcladores activos

6.2 Mezclador sencillo (single) con OL por puerta:

Ejemplo de Diseño



6. Mezcladores activos

- *Selección del dispositivo:*
 - MESFET : ideales para frecuencias < 20 GHz
 - HEMT: para frecuencias > 20 GHz
 - MOSFET: para frecuencias de RF
 - GaN: mezcladores para baja distorsión
- *Impedancia de entrada*
 - Se puede estimar por parámetros S
 - Con mayor precisión a través de un análisis no lineal
 - V_{ds} en zona de saturación (similar a un amplificador)
 - V_{gs} en pinch-off
- *Impedancia de salida*
 - Es casi infinita cuando se aplica señal LO
 - Escoger el valor de la carga para G_c sea aceptable

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{21}S_{12}}{1 + S_{22}}$$

$$G_c = \frac{G_{m,max}^2 R_L}{16\omega^2 C_{gs}^2 (R_s + R_g + R_i)}$$

6. Mezcladores activos

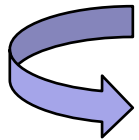
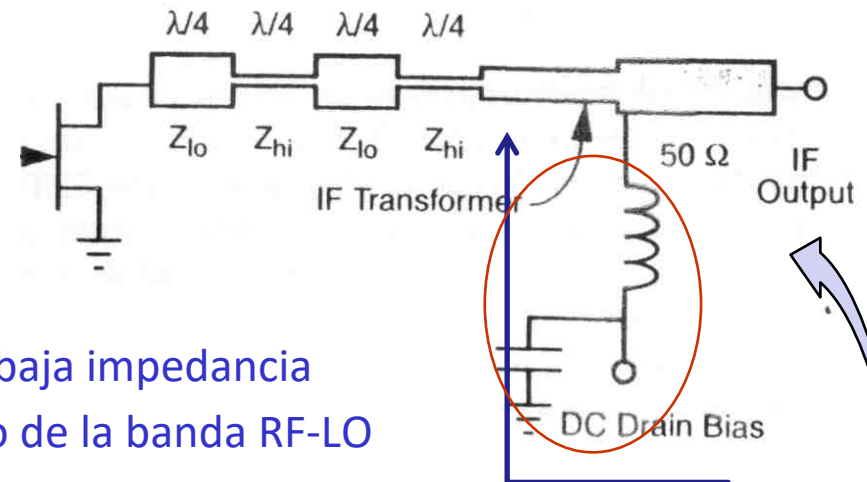
- Análisis no lineal para optimizar R_L
- Ajustar P_{LO} y V_{gs} para maximizar g_{m1}
- *Circuito de adaptación de entrada*
 - Difícil de adaptar para banda ancha
 - Opción: inductancia que resuene con C_{in} →
$$L_g = \frac{-I_m(Z_{in})}{2\pi f_0}$$
 - Estimar R →
$$R = -\frac{I_m(Z_{in})}{Q_L} - R_{in}$$
 (Q_L factor de calidad cargado)
 - Transformador $\lambda/4$
- *Circuito de polarización de puerta (“cortocircuito a IF”)*
 - Línea serie de alta impedancia y stub de baja impedancia
 - Ambos son $\lambda/4$ a $f_{central}$ de la banda RF-LO
 - C_b para cortocircuitar FI
 - R y C (alto) para añadir filtrado extra (protección frente ESD)

6. Mezcladores activos

- *Circuito adaptación/filtrado salida*

- Presentar R_L @ FI
- Cortocircuito a LO y armónicos
- Opción:


- secciones microstrip de alta y baja impedancia
- Cada tramo es $\lambda/4$ en el centro de la banda RF-LO
- Ajustar para el 2º armónico
- 3er armónico se puede cortocircuitar con un stub (si es necesario)
- Para FI, la estructura es una línea de transmisión con: $Z_{0,l} = \sqrt{Z_{hi}Z_{lo}}$
- Si $\rightarrow R_L = Z_{0,l} = Z_0$ (usualmente 50Ω), con Z_0 impedancia de salida de IF
- Si $\rightarrow R_L = Z_{0,l} \neq Z_0$ entonces: $R_L Z_0 = Z_{hi} Z_{lo} \rightarrow$ Transformador de FI
- Optimizar todo en un simulador no lineal
- Polarización de drenador \rightarrow Bloqueo de RF y condensador de "Bypass"



6. Mezcladores activos

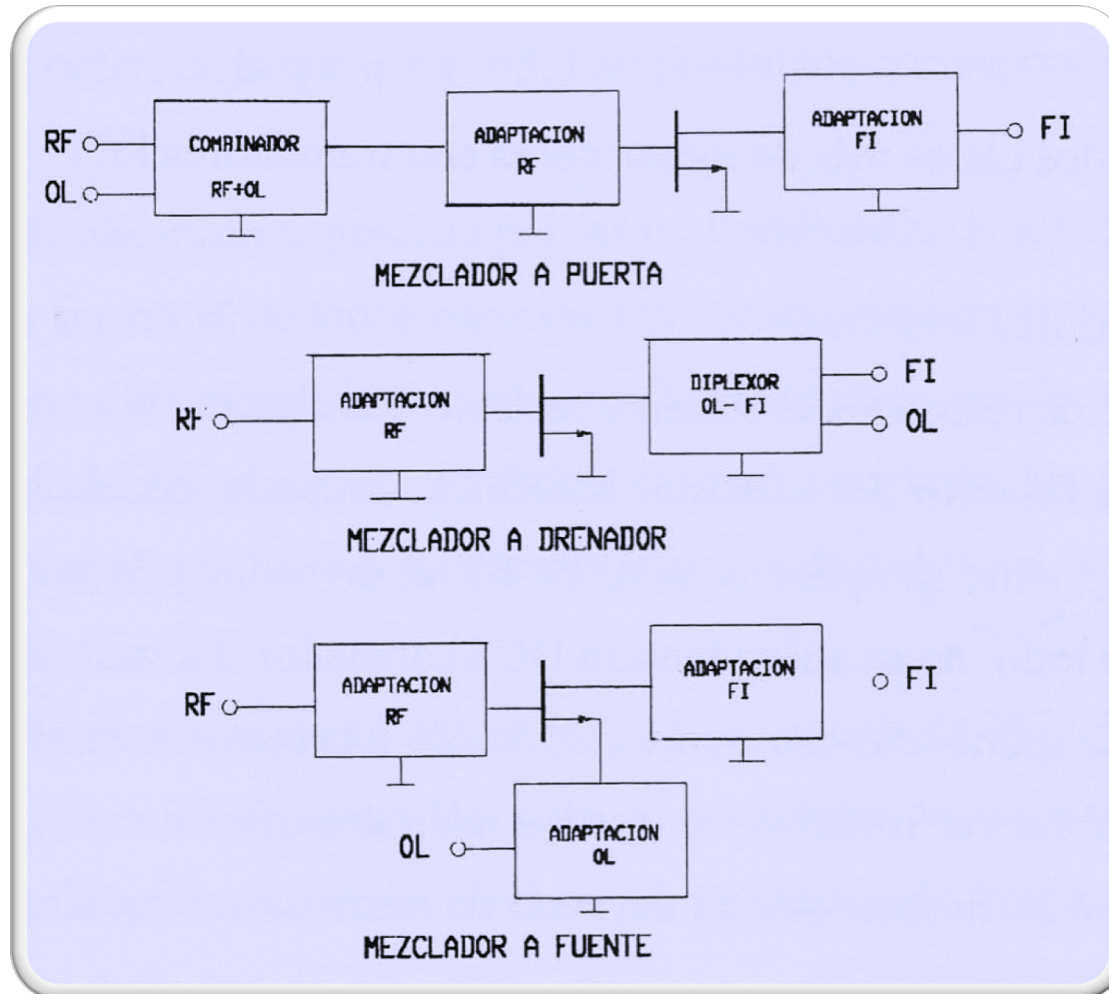
6.3 Otras configuraciones:

Mezclador con inyección de LO por drenador

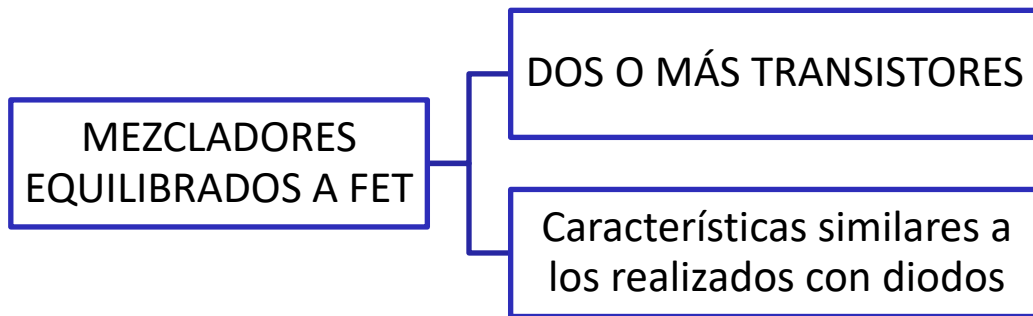
- En algunas aplicaciones la señal de LO no se puede inyectar por puerta.
 - Ocurre cuando no es posible separar las señales de RF y LO.
 - Terminales alternativos: Drenador (más habitual) y Fuente.
 - LO se inyecta por drenador, RF por puerta, FI se extrae del drenador a través de un diplexor.
- 
- Hay un cierto aislamiento entre los puertos de RF y LO.
 - Mezcladores a drenador tienen un comportamiento algo inferior a los mezcladores con inyección por puerta

6. Mezcladores activos

Configuraciones de un mezclador según la inyección de la señal de OL



7. Mezcladores equilibrados a FET



Ventajas de los mezcladores equilibrados

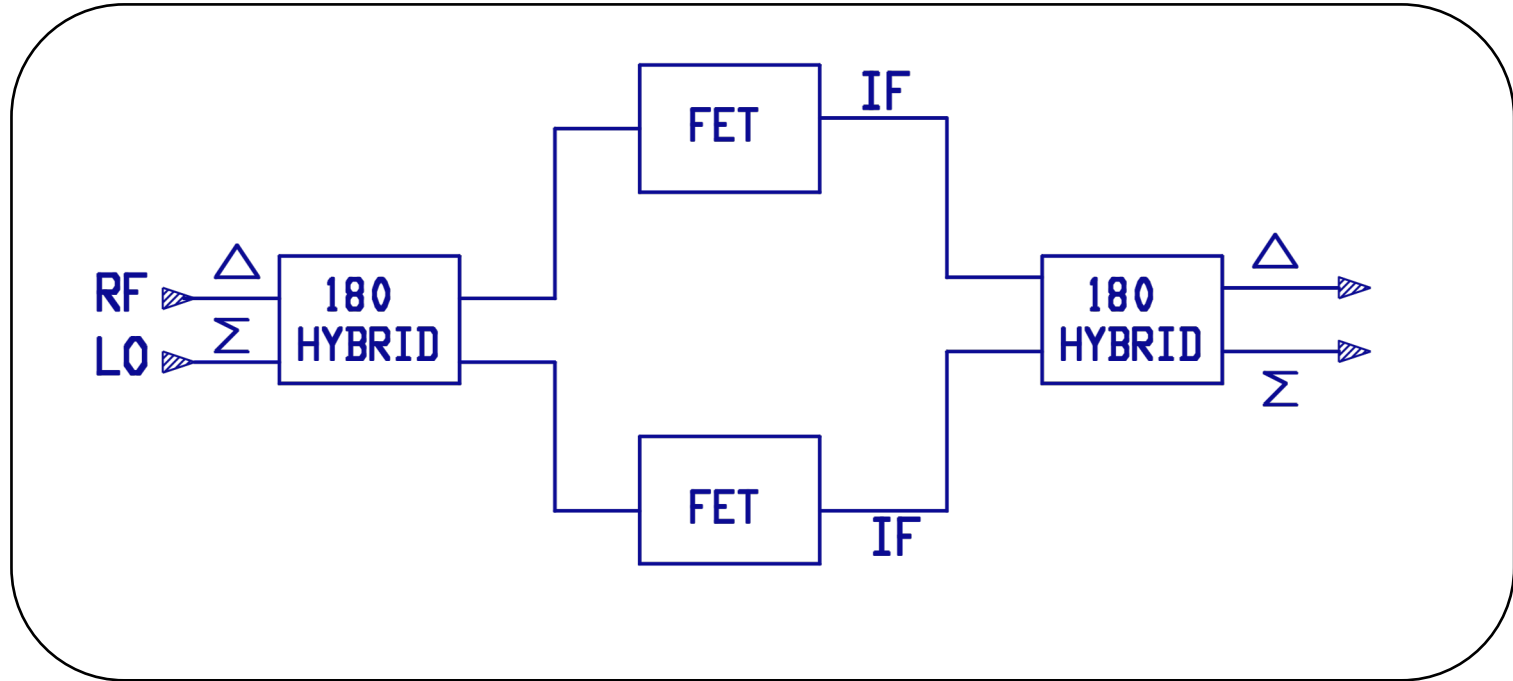
- Aislamiento inherente OL/RF & OL/FI
- Rechazan ruido AM de OL
- Rechazan ciertos productos de IM (par)
- Gc & NF similares a los construidos con un solo dispositivo
- IP3 mayores (~ 3 dB más alto)

Inconvenientes de los mezcladores equilibrados

- Mayor necesidad de potencia de OL (mayor de 3 dB)
- Mayor número de dispositivos

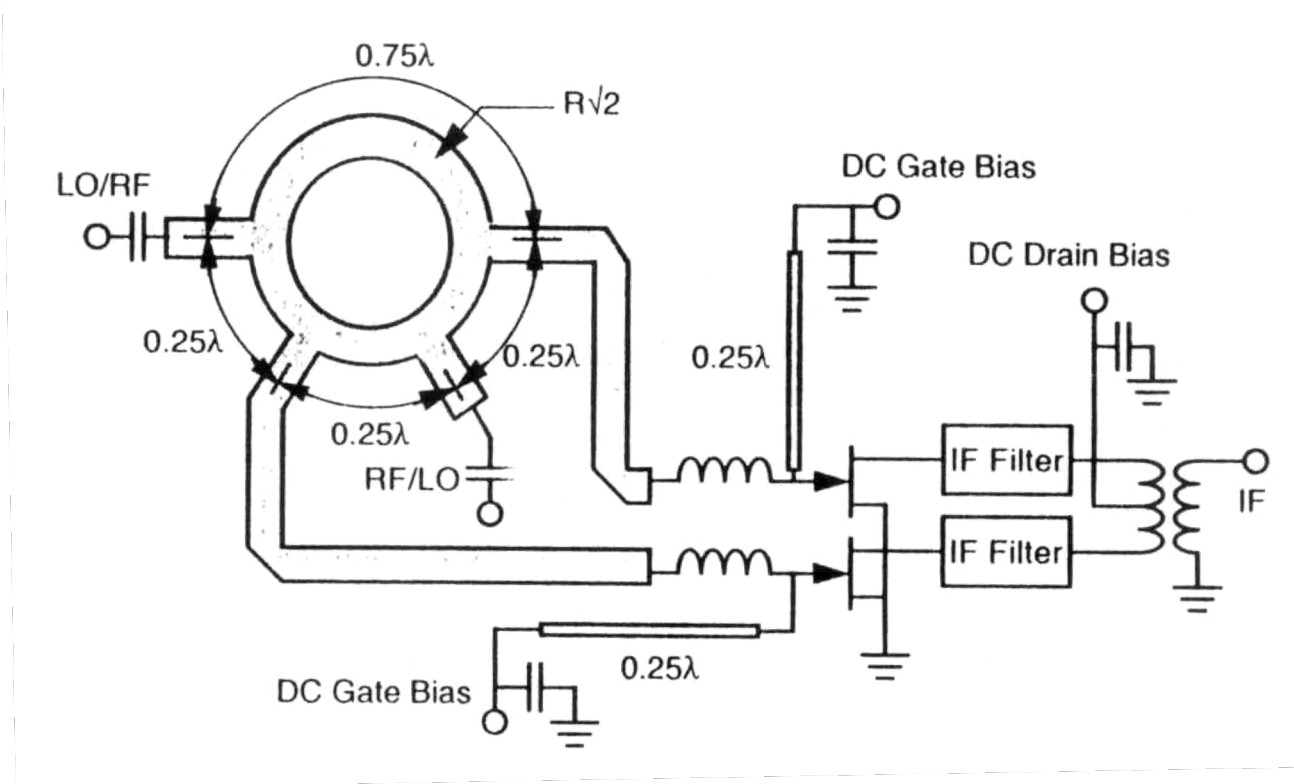
7. Mezcladores equilibrados a FET

Diagrama de bloques



7. Mezcladores equilibrados a FET

- Descripción de un mezclador equilibrado



- Se utiliza un híbrido Rat- Race para inyectar las señales de RF y OL.
- Necesidad de utilizar un híbrido para FI → Mayor desventaja de este tipo de circuitos, especialmente a bajas frecuencias de FI

7. Mezcladores equilibrados a FET

Red LO/RF

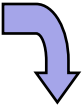
- Se utiliza una inductancia que resuena con la capacidad de entrada de cada FET, seguido de un transformador $\lambda/4$.
- Los stubs cortocircuitan la señal de FI a la entrada
- Los condensadores al final de los stubs deben cortocircuitar la frecuencia de FI más baja.
- Es necesario incluir condensadores de bloqueo DC a las entradas

Red IF

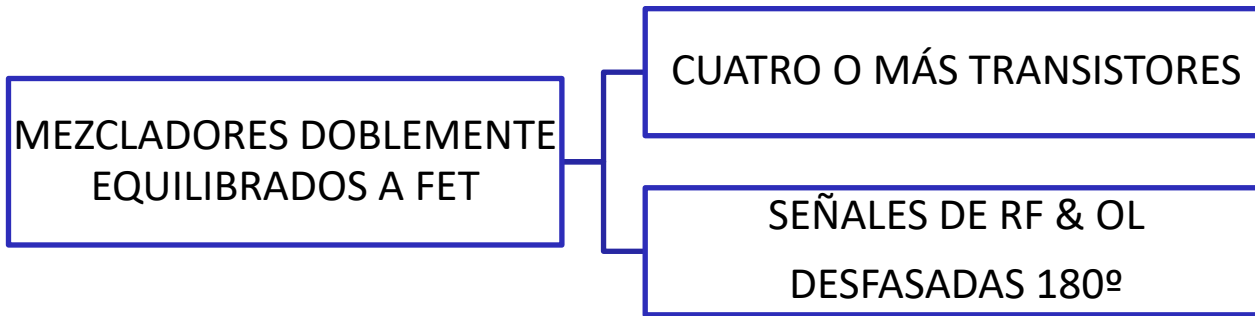
- Se deben cortocircuitar la señal de OL y sus armónicos
- Las corrientes de FI están desfasadas 180 grados
- Se debe añadir un balun ó híbrido



7. Mezcladores equilibrados a FET

- Si la señal de OL llega en fase a las puertas 
- El aislamiento OL/FI será pobre, sólo debido al balun de FI
- Será necesario algún elemento de bloqueo de OL a la salida
- Como norma general, se debe diseñar el híbrido y el mezclador con un solo dispositivo, por separado.
- Si la señal de OL se inyecta por la puerta diferencia, se cancelan los productos (1,2) y no los (2,1).

7. Mezcladores doblemente equilibrados a FET



Ventajas de los mezcladores equilibrados

- Aislamiento inherente entre todas las puertas
- Elimina el ruido AM de OL
- Rechazan todas las frecuencias espurias
- Presenta una banda muy ancha
- El terminal de FI es masa virtual para OL

Inconvenientes de los mezcladores equilibrados

- Mayor necesidad de potencia de OL
- Menor ganancia de conversión
- En general, muy difíciles de optimizar
- Equilibrio perfecto entre ramas es muy difícil en tecnología híbrida
- Degradación de las prestaciones a alta frecuencia


7. Mezcladores doblemente equilibrados a FET

Características:

- Los dispositivos superiores actúan como switches en estados alternativos on y off durante el ciclo de LO
- Los dispositivos inferiores actúan como amplificadores
- Como dispositivos activos se pueden usar BJT, MESFET, HBT, HEMT, MOSFET ...en función de la frecuencia.
- A frecuencias mayores de 20 GHz, el comportamiento se ve degradado por la inductancia de las conexiones entre los transistores y por el desequilibrio causado por las inevitables longitudes diferentes.
- Para frecuencias altas → usar diodos

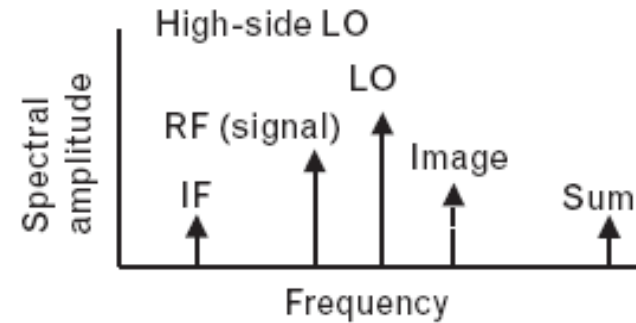
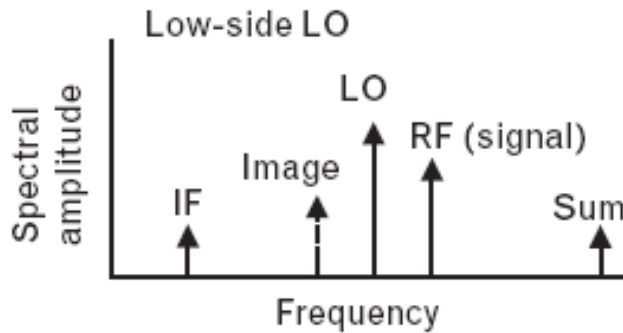
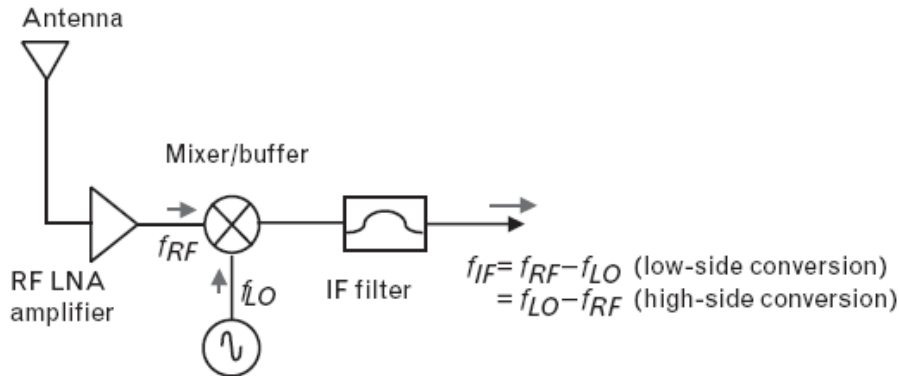
7. Mezcladores doblemente equilibrados a FET

Diseño:

- Dado que no hay tensión de OL en los drenadores de los transistores superiores ni en los de los inferiores
- 
- Los circuitos de entrada en los accesos de RF y OL se simplifican mucho
 - Las entradas de RF se deben cortocircuitar a FI
 - Escoger las anchuras de los transistores teniendo en cuenta que por los transistores inferiores circula doble corriente que por los superiores.
 - Híbridos 180 grados ó baluns se pueden usar para conseguir el desfase necesario para las señales de RF y OL .

8. Mezcladores de rechazo de frecuencia imagen

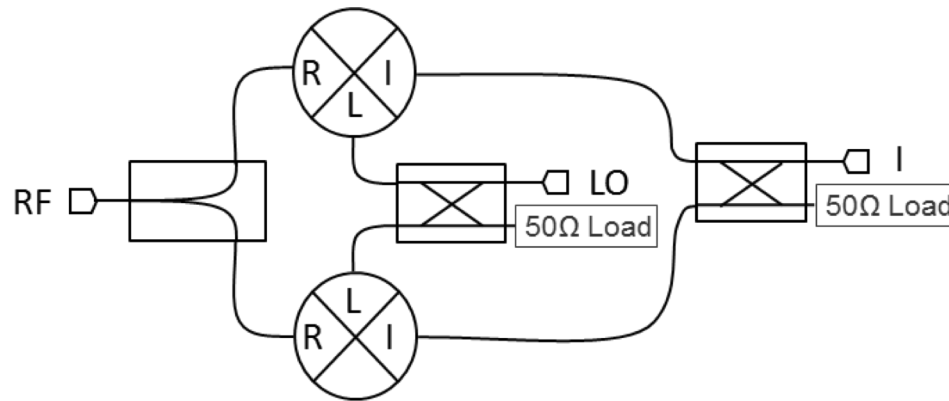
- Un sistema con conversión hacia abajo (down-conversion)



- Si una señal interferente a la frecuencia imagen se mezcla con la señal de LO, la frecuencia resultante no se podrá ser distinguida de IF.

8. Mezcladores de rechazo de frecuencia imagen (IR)

- Estos mezcladores se realizan con dos mezcladores equilibrados
- Especialmente útil cuando las bandas de RF e imagen se solapan, o está demasiado cerca de la señal de RF para ser filtrada
- Las señales de RF se aplican en fase
- Las señales de LO se aplican desfasadas 90°
- El híbrido 90° que combina las señales de salida permite separar la señal de IF de la imagen (USB & LSB)



- El rechazo a la frecuencia imagen mejora con la potencia de LO
- El rechazo a la frecuencia imagen depende fuertemente del equilibrio en fase

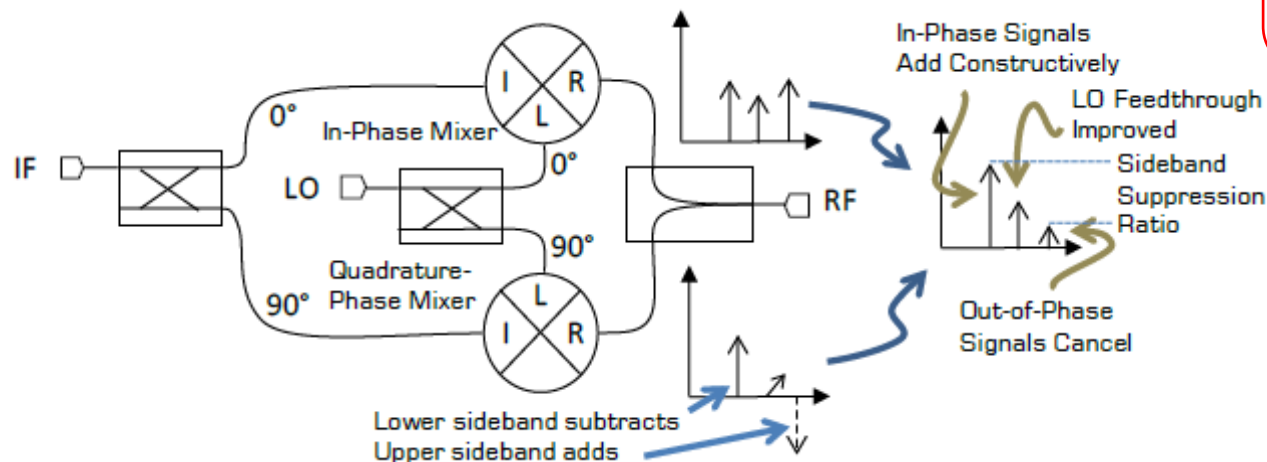
8. Mezcladores IR: Funcionamiento

- $F_{USB} = F_{LO} + F_{IF} \rightarrow \Delta \text{ Fase} = 0^\circ$
- $F_{LSB} = F_{LO} - F_{IF} \rightarrow \Delta \text{ Fase} = 180^\circ \text{ (} 90^\circ + 90^\circ \text{)}$
- Para señal I \rightarrow ambas señales llevan fase 0°
- Para señal Q \rightarrow LSB lleva fase 0° y USB lleva fase 180°

En el combinador



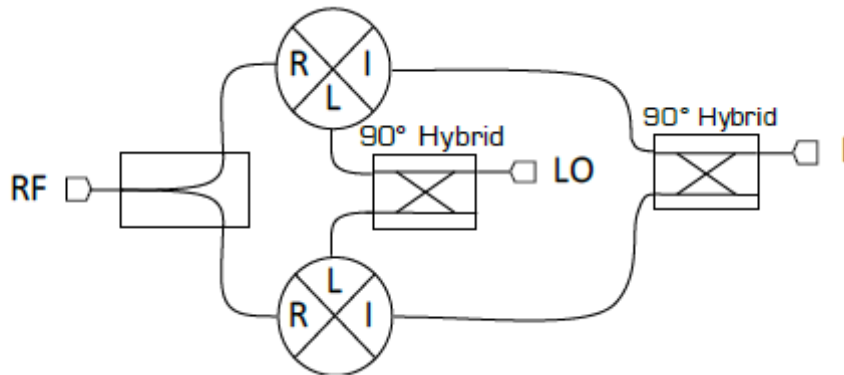
Se cancela USB



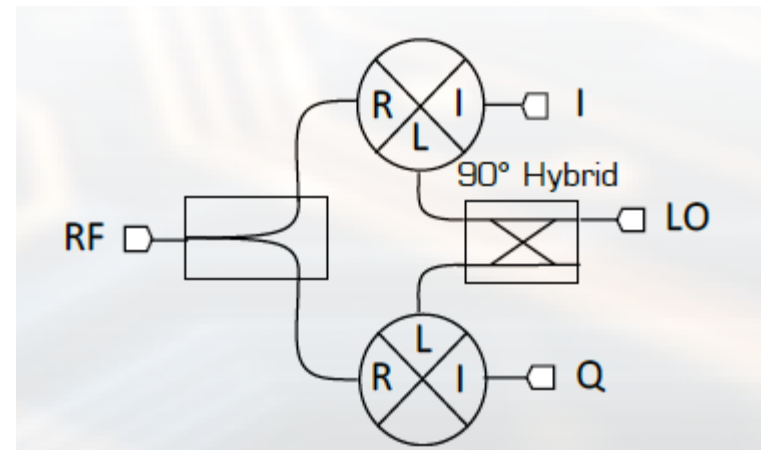
- Se manipulan las fases para suprimir señales indeseadas sin usar filtros
- Permiten eliminar o relajar los requerimientos de los filtros
- Se pueden hacer varias combinaciones para cancelar las señales

8. Mezcladores en fase/cuadratura (Moduladores IQ)

- Permiten mezclar simultáneamente las componentes en fase (I) y en cuadratura (Q) (mezcladores complejos)
- El mezclador IQ es similar al mezclador IR pero elimina el híbrido de IF



Mezclador IR

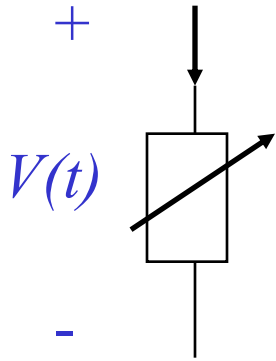


Mezclador IQ

- Cada fase de la señal de RF se puede recuperar separadamente (I & Q)
- En modo transmisión se pueden aplicar diferentes señales a los puertos I & Q.

9. Mezcladores resistivos

Fundamentos de los mezcladores resistivos



$$i(t) = g(t)v(t)$$

En principio, esta ecuación es lineal.

Para la mezcla, es necesario que $g(t)$ sea variable con el tiempo

Si $g(t)$ pudiera ser lineal y variable con el tiempo:



Se tendría un mezclador sin distorsión

9. Mezcladores resistivos

Diseño de un mezclador resistivo a FET

- Se requiere un dispositivo que presente una resistencia linear que pueda ser controlada por una tensión ó corriente de una señal.

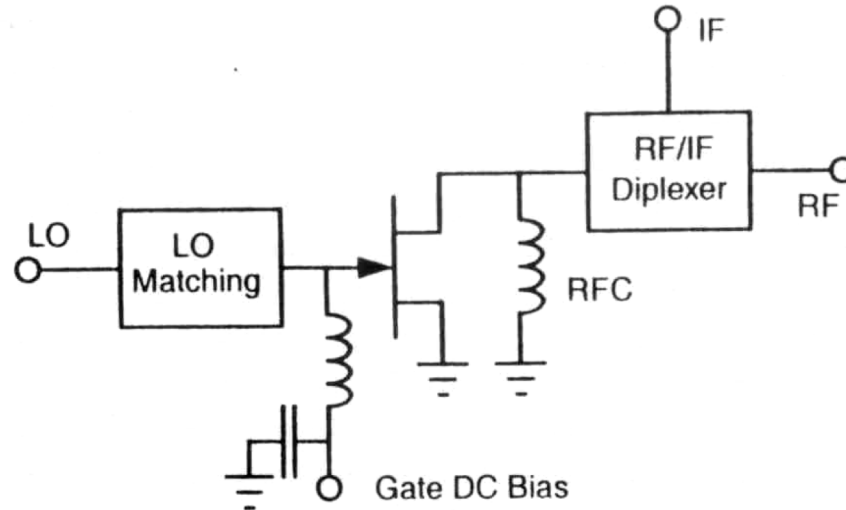


- El canal de un transistor FET no polarizado ($V_{ds}=0$)
- A baja tensión de drenador, el canal opera como una resistencia “linear”, donde la conductancia de pequeña señal es:

$$G = \frac{\mu q N_d W t}{l}$$



- Variando V_{gs} , se varía t  varía la conductancia

9. Mezcladores resistivos



- La señal de OL siempre se aplica a la puerta.
- Se utiliza un diplexor para las señales de RF y FI
- El drenador siempre está a masa en dc
- El drenador debe estar cortocircuitado a OL

9. Mezcladores resistivos

- Dado que C_{gd} es mayor en la zona lineal que en saturación:

- Existirá un mayor acoplo entre la puerta y el drenador

- El dispositivo puede entrar en saturación \Rightarrow Mayor IMD
- Polarización del FET para una buena eficiencia en la conversión:
 - - La conductancia debe ser ajustada, para maximizar su componente fundamental \Rightarrow Polarizarlo en el pinch-off
 - -Para baja distorsión se necesitarán altos niveles de potencia de OL

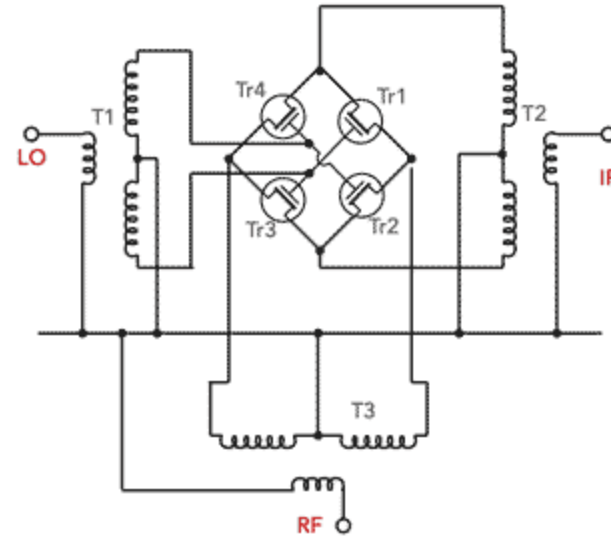
9. Mezcladores resistivos

Resumen de requerimientos de diseño para Mezcladores Resistivos a FET

- Cortocircuitar el drenador a la frecuencia de OL
- Cortocircuitar el drenador en dc
- Adaptar la puerta, si es posible, a la frecuencia de OL
- Adaptar el drenador a las frecuencias de RF y FI
- Ajustar la tensión de polarización de puerta a medio camino entre el valor de break-down y el de conducción.
(Valor ligeramente menor que el valor de pinch-off).
- Ajustar el nivel de OL al máximo sin permitir que entre en conducción.

9. Mezcladores resistivos equilibrados a FET


- Double balanced FET mixer
- Alternativa al diseño del anillo de diodos
- Los transistores FET están polarizados con $V_{ds}=0$
- Buena linealidad
- Durante el ciclo positivo del LO \rightarrow 2 FETs están en conducción (2 en OFF)
- Presentan P1dB mayor que el mezclador equivalente con diodos



10. Mezcladores armónicos

- Un mezclador sub-armónico tiene la señal de LO a la frecuencia LO/n
- Los mezcladores armónicos se suelen usar cuando la frecuencia de la señal de OL se considera demasiado alta y la alternativa es usar un generador armónico: doblador, triplicador ...
- Usando un mezclador armónico se puede omitir el generador armónico y eventualmente un amplificador de potencia para esta señal.

Ventajas:

- La frecuencia de OL es sólo la mitad ($1/3, \dots$) de la frecuencia de bombeo
 - Se suprime el ruido AM del oscilador
 - Las frecuencias de RF y OL están muy separadas
- 
- Facilita la construcción del diplexor

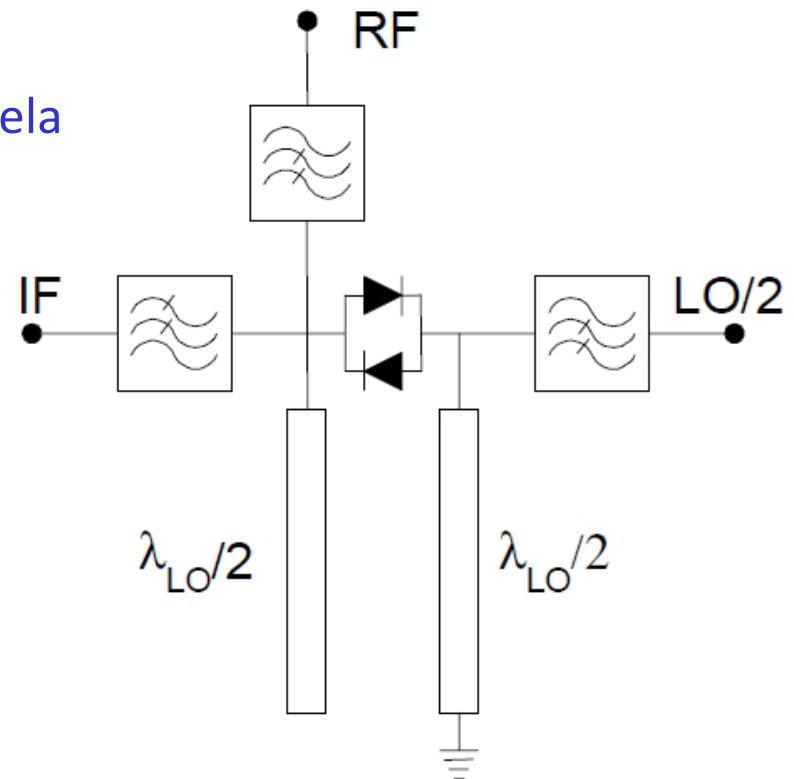
10. Mezcladores armónicos

Desventajas:

Presentan mayores pérdidas de conversión (3 dB más para un mezclador subarmónico)

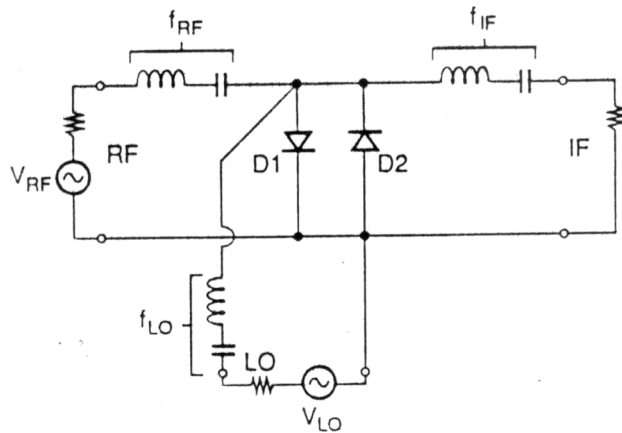
Dispositivos:

- Tradicionalmente se han usado dos diodos Schottky en configuración antiparalela
- Transistores MESFET , HFET y HEMT son actualmente empleados dada su alto nivel de integración para circuitos MMIC

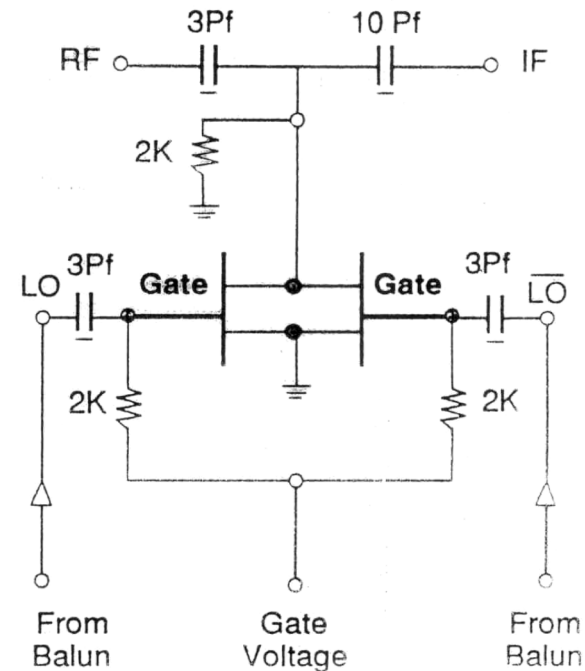


10. Mezcladores armónicos

- *Topología tradicional basada en un par de diodos antiparalelos:*




*Mezclador Subarmónico
Resistivo con transistores
HEMT:*



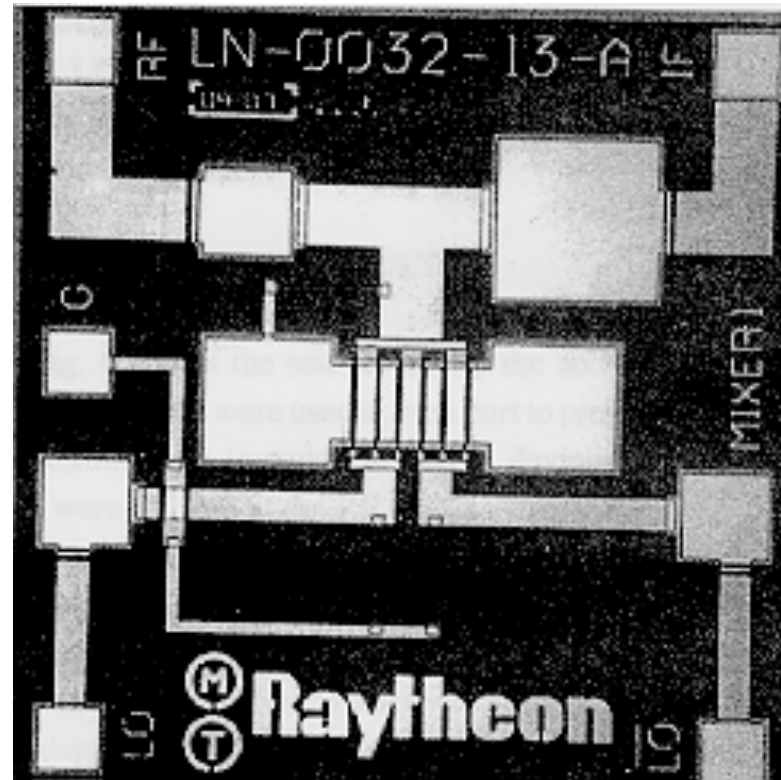
10. Mezcladores armónicos

Descripción del circuito:

- La señal de OL se inyecta a ambas puertas con la misma amplitud pero desfasadas 180 grados.
 - La señal de RF se aplica a los drenadores
 - La conversión de frecuencia se produce debido a la variación con el tiempo de la conductancia del canal.
 - Por construcción, la forma de onda de la conductancia contiene solo armónicos de OL de orden par.
- 
- Cancelación del armónico fundamental de OL
 - La señal de FI se extrae del drenador a través de un filtro
 - Para obtener las menores pérdidas de conversión se deben polarizar los dispositivos próximos al pinch-off

10. Mezcladores armónicos

- Fotografía de un mezclador armónico en tecnología monolítica



Material Adicional

- Algunos video tutoriales sobre mezcladores de RF: principios de funcionamiento, diseño y medida:
 - <https://youtu.be/deNIExgwPaA?si=Y4yUnst56q4NzBhM>
 - <https://youtu.be/8q7GaTYpHn0?si=IIBX8kUrTh6EBmeu>
 - <https://youtu.be/Mm7WfVzr1ao?si=xJZYwuPvH1uVVs7>