

Osciladores

Parte 3

Resonadores

Piezoeléctricos

Universidad Tecnológica Nacional de Argentina - F. R. Córdoba

Departamento de Electrónica - Electrónica Aplicada III

Daniel Rabinovich drabinovich@electronica.frc.utn.edu.ar

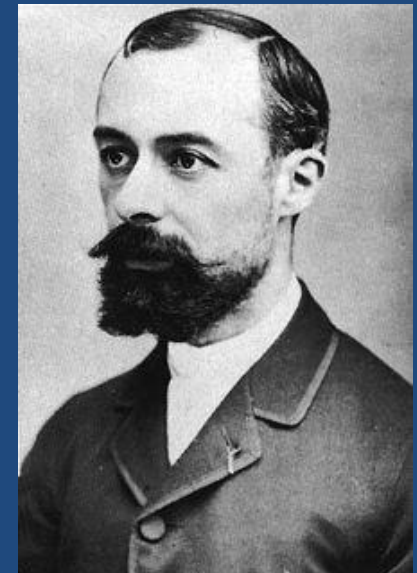
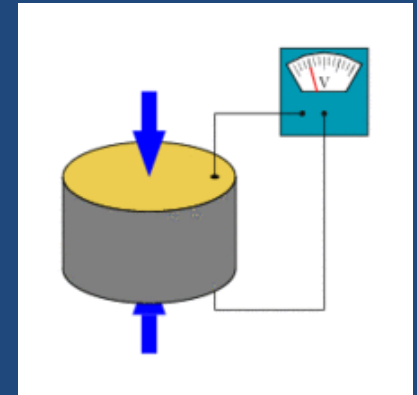
Ramón Oros roros@electronica.frc.utn.edu.ar

Claudio Paz cpaz@frc.utn.edu.ar

Año 2016

- Piezoelectricidad

- Ciertos cristales y cerámicas, cuando se los somete a una deformación mecánica, desarrollan un potencial eléctrico entre dos electrodos en contacto con la superficie del material
- Es un fenómeno reversible
- El fenómeno se llama piezoelectricidad
- Fue observado por 1ra vez por
 - Antoine Cesar Beckquerel en 1820
 - La primera guerra a comienzos del siglo 20 y su aplicación al sonar submarino desata las investigaciones sobre los materiales piezoeléctricos



- Resonadores de cuarzo BAW (body acoustic wave)

- El cuarzo SiO_2 en su forma cristalina es piezoeléctrico
- Es altamente estable con la temperatura
- Es mecánicamente rígido (altas frecuencias)

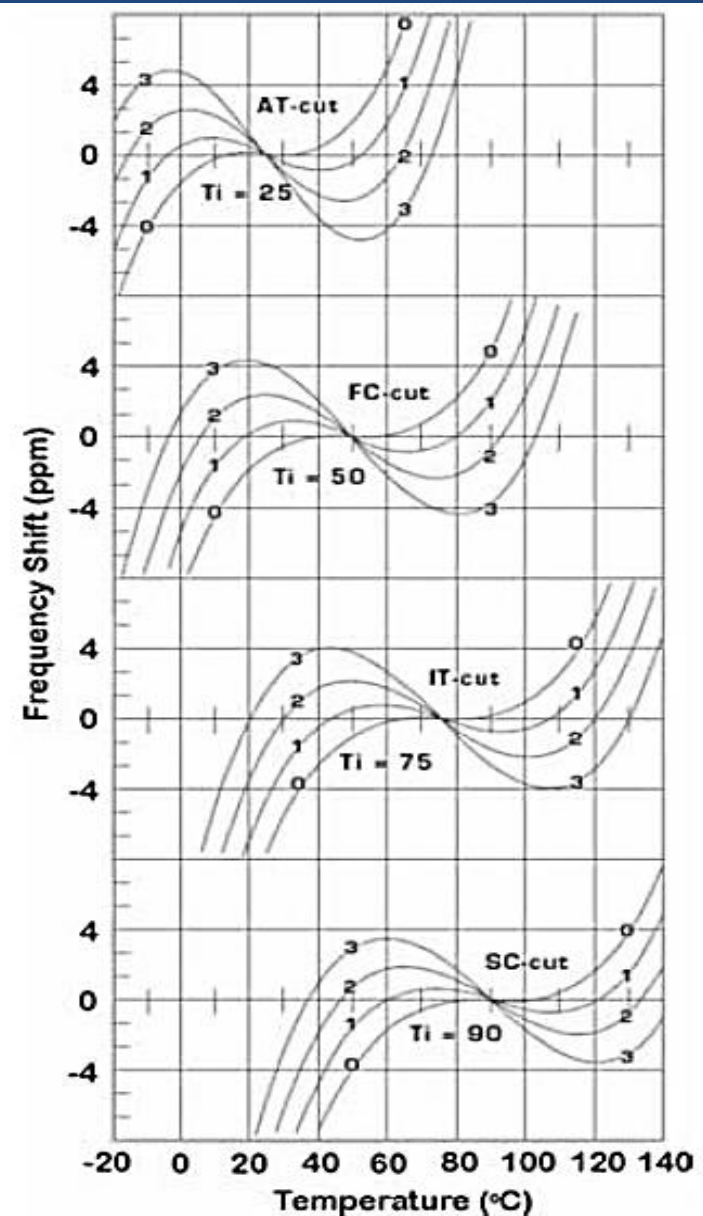
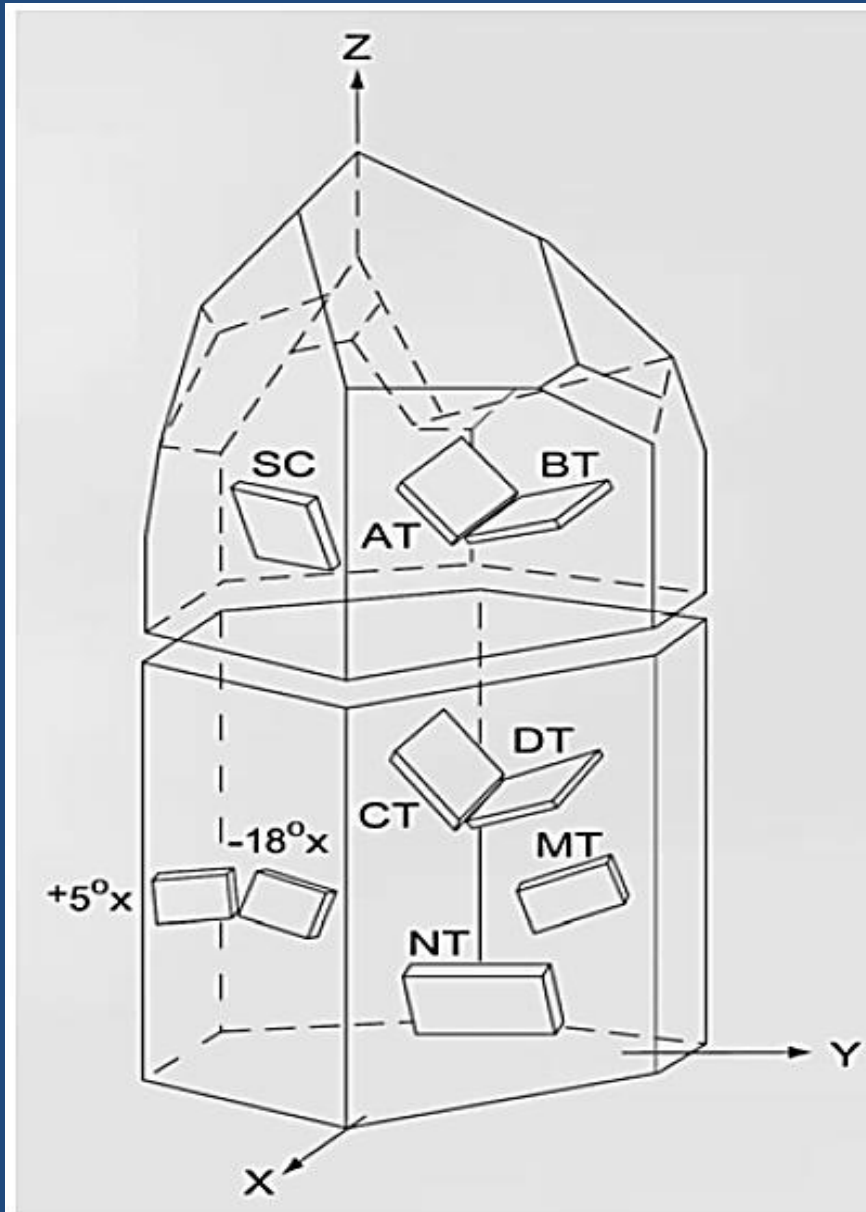


- Hoy se cultivan en autoclaves
- Se fabrican mas 1000 millones anualmente
- Cuando se lo excita almacena una energía tremenda lo que equivale eléctricamente a un altísimo Q descargado

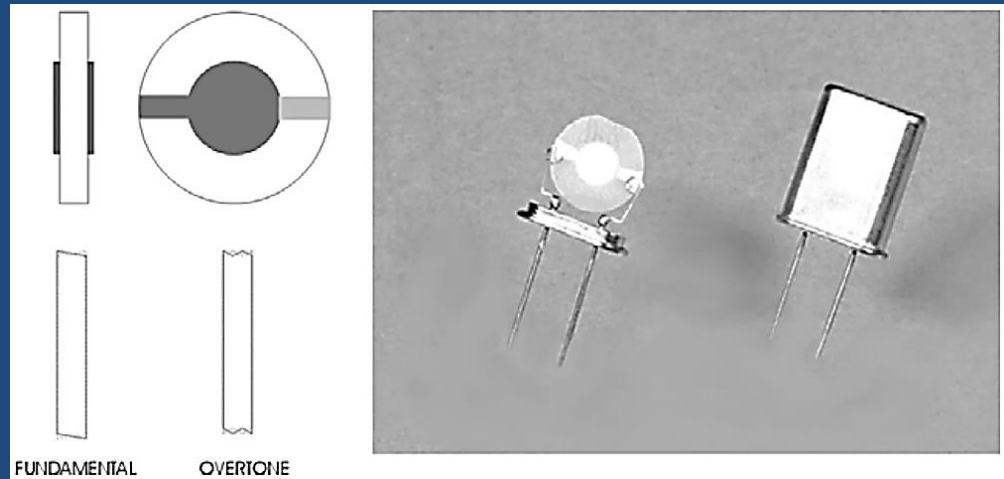
$$Q = \frac{2\pi \text{ Energía máxima almacenada por ciclo}}{\text{Energía disipada por ciclo}}$$

- Las obleas de cuarzo plateado pueden trabajar en mucho modos
- Las vibraciones afectan a todo el cuerpo en contraposición a los resonadores de onda acústica superficial SAW

- Cortes del cristal de cuarzo

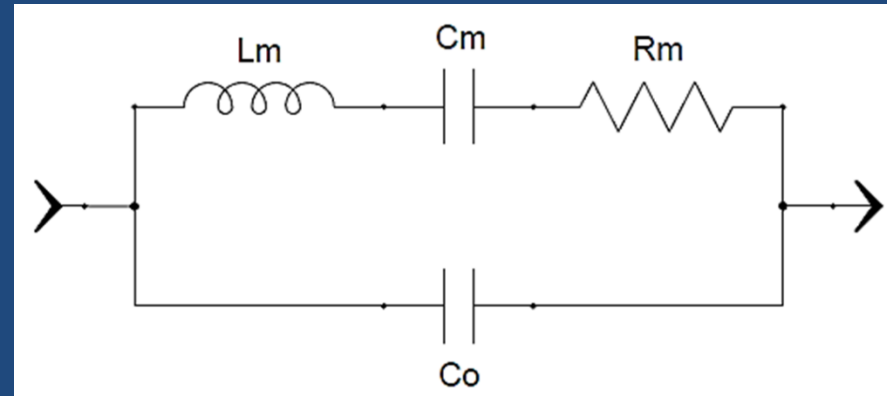


- Las láminas delgadas cortadas de un cristal se las llaman obleas (blanks)
- El corte AT es el más usado para $f \geq 1$ MHz, temperatura de inflexión 25°C
- El ángulo de corte controla las características con la temperatura que varían con minutos de arco
- El funcionamiento en el punto de inflexión es el que da mayor estabilidad
- Para rangos de f amplios, es mejor el ángulo de corte con mayor numeración
- Los cortes con temperaturas altas de inflexión se usan para OCXO
- Un corte AT vibra en cizalla o al corte
- El espesor de la oblea determina la frecuencia de resonancia
- Arriba de 20 MHz la oblea se vuelve muy fina y frágil
- Para frecuencias más elevadas se los hace funcionar en sobretono
- Solo son prácticos los sobretonos impares hasta el 11avo, superando los 200 MHz (sobretono \neq armónico)
- Mayor sobretono, mayor cantidad de espurias
- Para funcionamiento en sobretono hay que especificar al fabricante o viceversa



- Modelo del resonador a cristal

- El modelo eléctrico equivalente es eficaz para aplicar con éxito las técnicas de diseño descriptas aquí
- C_0 es la capacidad estática de los electrodos separados por la oblea más la capacidad distribuida
- L_m , C_m , y R_m , son los parámetros movicionales y modelan la resonancia serie producida por el efecto piezoeléctrico
 - La resistencia movicional R_m no es llamativamente baja
 - El valor de L_m es sorprendentemente alto
 - C_m es extremadamente pequeña
 - Un valor típico de reactancia supera 1 Mohm a 10 MHz
- El Q descargado es elevadísimo por la alta energía almacenada y no por una baja pérdida resistiva



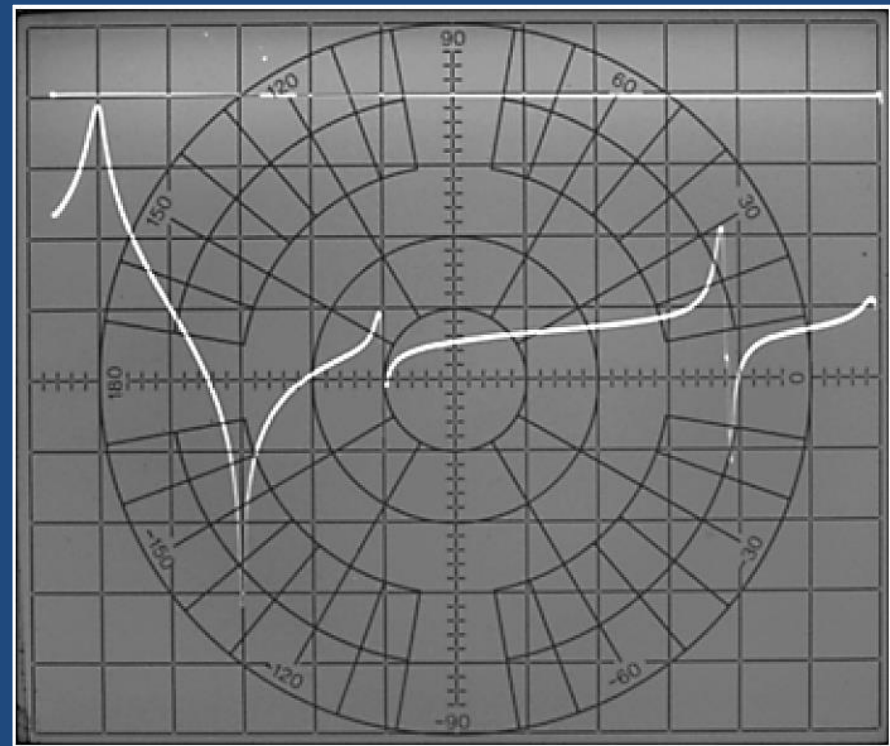
• Parámetros típicos de los cortes AT y SC

- Los valores de R_m son máximos. Los típicos están alrededor de $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{2}$ de los máximos
- Los valores Q descargado se calculan a partir de C_m y los valores típicos de R_m
- Los fabricantes ofrecen variantes de
 - Encapsulado
 - Tolerancias
 - Relleno: vacío o aire
 - Diámetro oblea
 - Diámetro electrodo
- Se puede alcanzar un Q de 1 millón con técnicas apropiadas
- Se puede contactar a los fabricantes por detalles

Frecuencia (MHz)		Modo	R_m máx. (ohm)	C_0 (pF)	C_m (fF)	Q
1,0-1,5	AT	Fund	525	4	10	73.000
1,5-2,0	AT	Fund	250	4	10	109.000
2,0-3,0	AT	Fund	150	4	11	116.000
3,0-5,0	AT	Fund	80	4	12	124.000
5,0-7,0	AT	Fund	45	4	13	136.000
7,0-10	AT	Fund	35	5	14	115.000
10-15	AT	Fund	30	5	16	80.000
15-30	AT	Fund	27	6	18	56.000
15-60	AT	3ro	40	5	1,6	187.000
45-100	AT	5to	60	5	0,6	166.000
100-140	AT	7mo	120	5	0,3	111.000
140-180	AT	9no	180	5	0,2	83.000
5,0-7,0	SC	Fund	45	6	4	442.000
7,0-10	SC	Fund	35	6	5	321.000
10-15	SC	Fund	30	6	5	255.000
15-30	SC	Fund	27	6	6	182.000
15-60	SC	3ro	40	6	0,5	597.000
45-100	SC	5to	60	6	0,2	497.000

- Respuesta de transmisión $|S_{21}|_{dB}$ de un cristal de 9,6 MHz en fundamental

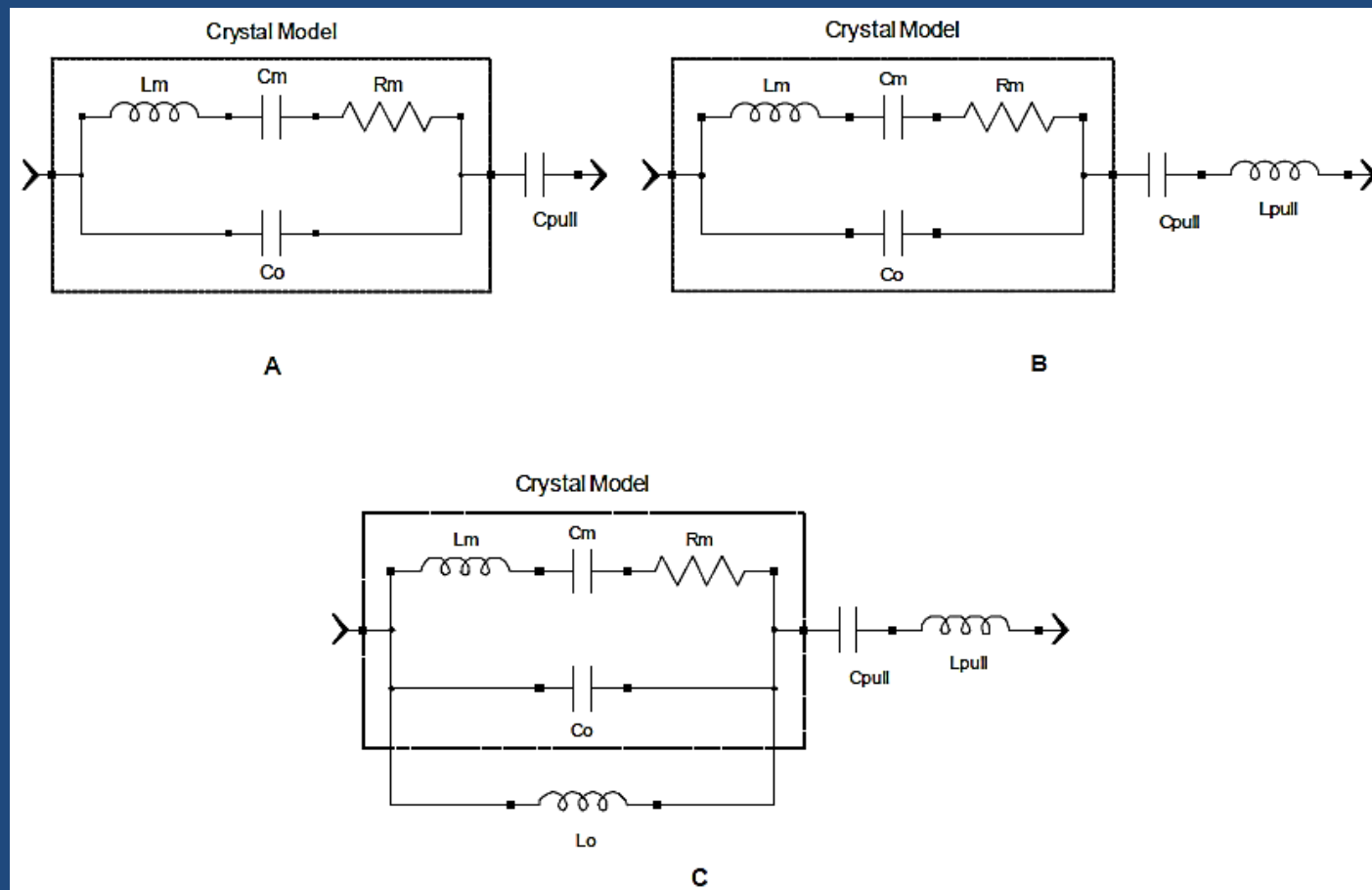
- Encapsulado HC-49/U
- Escala vertical 10 dB/div y horizontal 10 kHz/div
- Primer pico a la izquierda (9600 kHz) es la resonancia la rama movicional, por encima se vuelve inductivo
- En 9620 KHz sucede un nulo, la reactancia inductiva resuena en paralelo con la capacidad estática C_0
- Esta resonancia paralela se la llama antirresonancia
- En la pantalla del analizador de redes se pueden ver modos de resonancia no esenciales en 9640, 9689, y 9709 kHz
- Los parámetros del cristal se pueden calcular a partir de esta respuesta



- Cálculo de los parámetros de un resonador de cristal a partir de la medición con el analizador de redes
- La capacidad estática C_0 se mide con capacímetro en baja f
 - La C_m está dada por
 - $$C_m = C_0 \left[\left(\frac{f_p}{f_s} \right)^2 - 1 \right]$$
 - La L_m se calcula a partir de C_m con la f_s
 - $$L_m = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 C_m}$$
 - Suponiendo que la reactancia de C_0 es mucho mayor que R_m
 - $$R_m = 2Z_0 (10^{IL/20} - 1)$$
 - Se midió $C_0 = 5,45$ pF y $IL = 0,95$ dB en un sistema de 50 ohm
 - Con los datos medidos resulta
 - $R_m = 11,6$ ohm, $C_m = 22,73$ fF, $L_m = 12,09200062$ mH y el $Q = 62900$

- Pulling de la frecuencia de un cristal
 - La frecuencia de funcionamiento de un oscilador normalmente no es ni la f serie ni $||$ del cristal
 - La frecuencia de funcionamiento de un oscilador con un resonador a cristal es la frecuencia en que los criterios de oscilación son satisfechos
 - Las reactancias de acoplamiento del cristal y la respuesta de fase de la etapa de sostenimiento afectan a la f de oscilación
 - Objetivo de diseño: que solo el resonador a cristal establezca la f de oscilación
 - Sin embargo a veces es deseable desplazar intencionalmente la f de oscilación o modularla

- Técnicas de pulling
 - La técnica A es muy usada
 - C_{pull} cambia la frecuencia de resonancia serie del cristal reduciendo la C_m



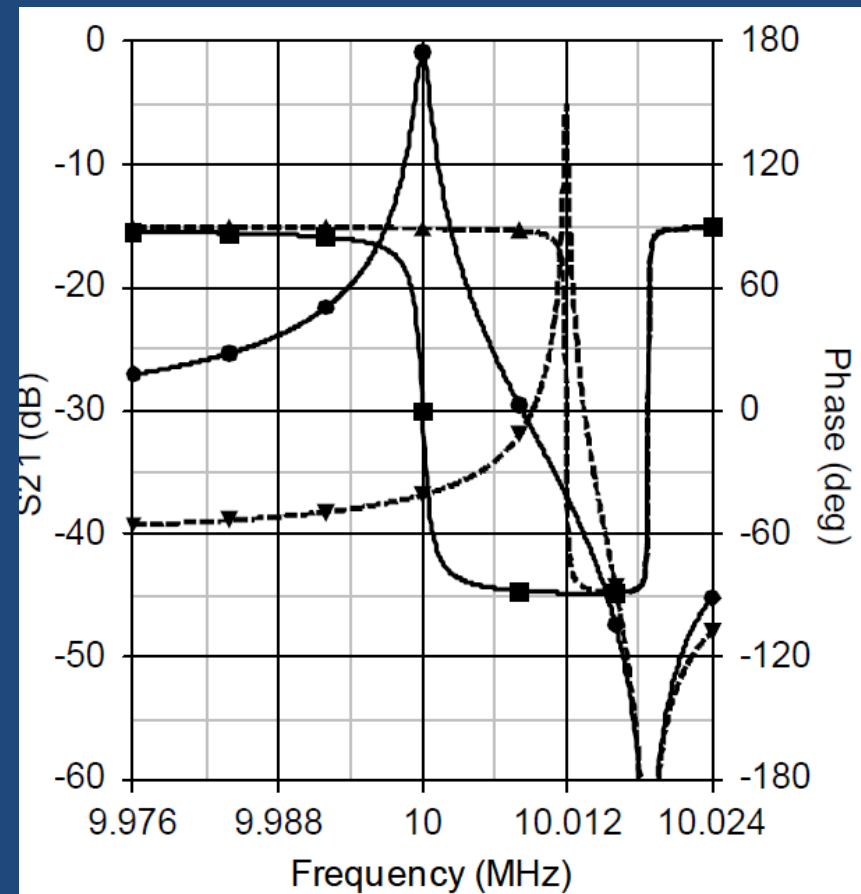
- $C_{pull} = 2,3 \text{ pF}$ desplaza la f de resonancia serie en 15 kHz
- Hay aumento en la pérdida de inserción IL
- El límite teórico de pulling es

- $$\frac{\Delta f}{f_s} = \sqrt{1 + \frac{C_m}{C_0}} - 1$$

- Para corte AT

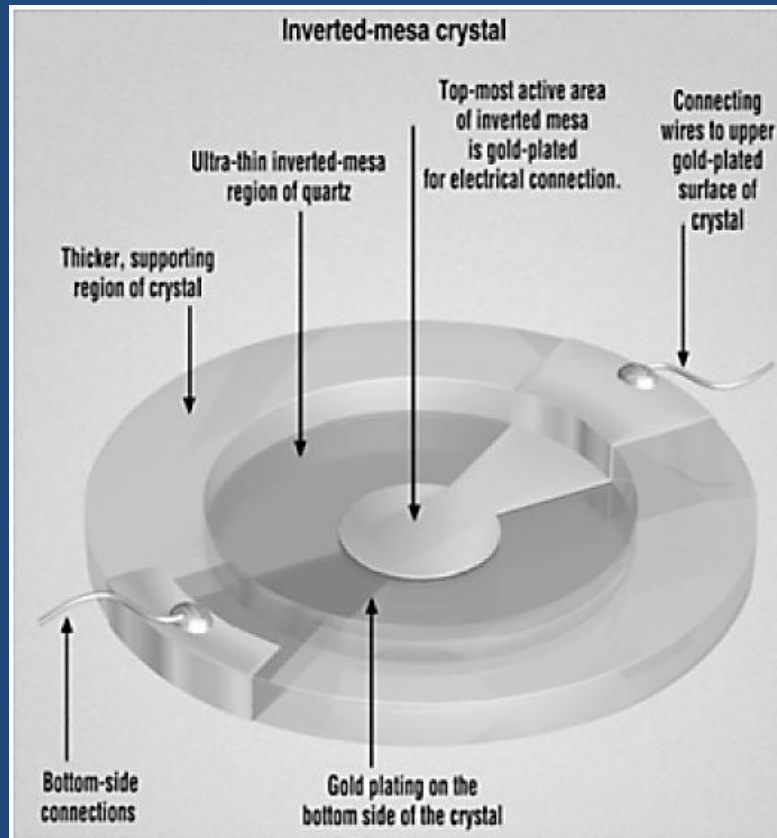
$$C_0/C_m \approx 180 \dots 450$$

- Máximo pulling de la técnica A va de 0,11 a 0,33%
- Debido a la pérdida de inserción el rango práctico es mucho menor



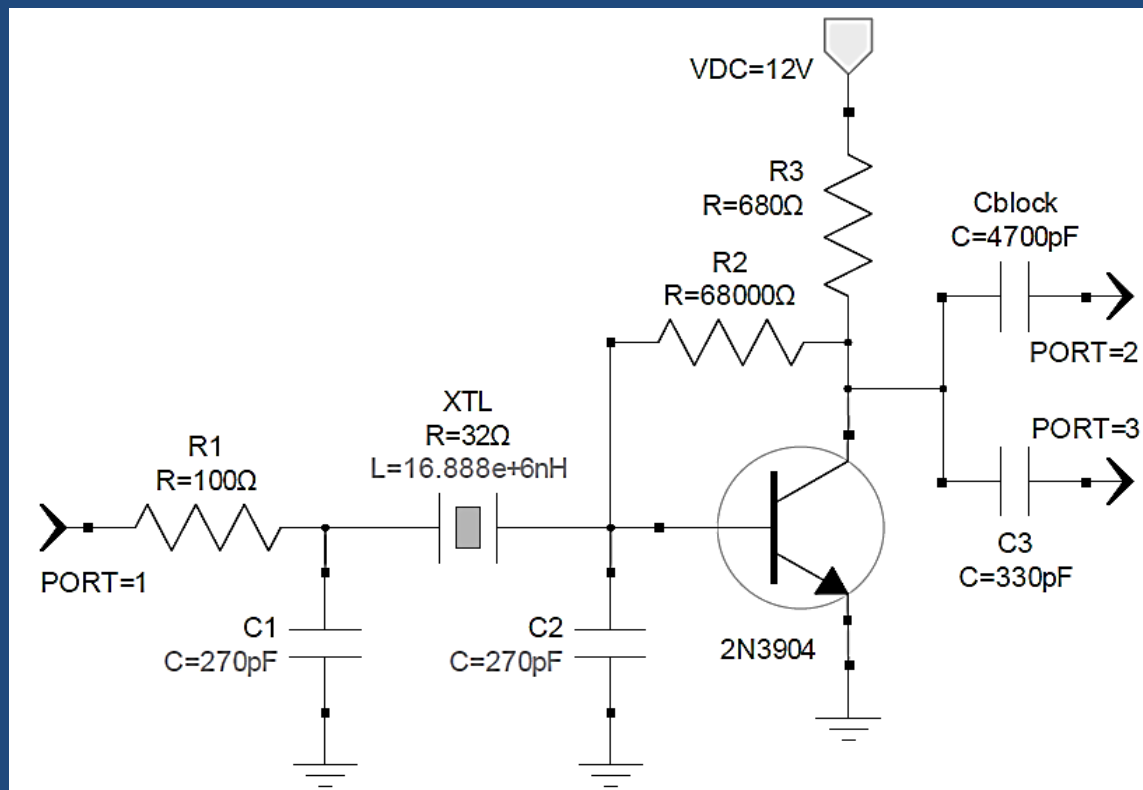
- La técnica B permite disminuir la f de resonancia serie
- Normalmente L_{pull} fijo y C_{pull} ajustable
- Con la técnica C Se puede anular la frecuencia de resonancia || haciendo resonar C_0 con L_0 aumentando así el límite teórico de la técnica A
- Mientras otros parámetros siguen iguales la C_m es inversamente proporcional al cuadrado del sobretono, entonces
 - $\frac{\Delta f}{f_s} \propto \frac{1}{\text{sobretono}^2}$
- Cuanto más elevado es el sobretono es más difícil realizar el pulling
- El propósito de usar un cristal es por su alta estabilidad, los elementos concentrados para el pulling no son tan estables

- Resonador mesa invertida



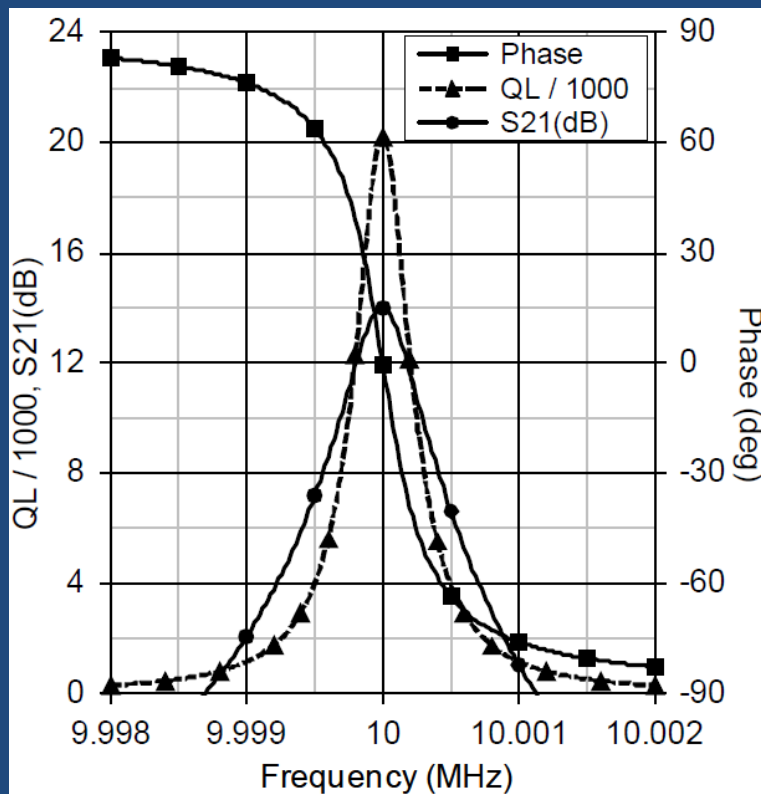
- Esta geometría ya es ofrecida por muchos fabricantes
- El desbaste entrante es químico
- El anillo externo da resistencia estructural a la región plana delgada
- Se puede llegar a cientos de MHz en fundamental
- Micro Crystal Switzerland ofrece cristales en encapsulados cerámicos SMD de 3,7 x 8 mm de 30 a 250 MHz
- A 50 MHz, R_m máxima = 50 ohm y R_m típica = 15 ohm
- Para cristales entre 50 y 155 MHz, C_m típica = 5,6 fF
- C_0 varía entre 2,0 pF a 50 MHz a 2,9 pF a 155 MHz
- Los electrodos se realizan pequeños para que C_0 sea bajo a pesar de la delgadez del dieléctrico

- Oscilador a cristal Pierce con BJT en 10 MHz
 - El cristal al estar en serie con el transistor funciona con un pico de transmisión cerca de la resonancia serie del cristal
 - El circuito no parece muy adecuado para un oscilador ya que el desfase en resonancia serie es 0° y el desfase del transistor es 180°



- R_1 con C_1 y R_m con C_2 producen el desplazamiento adicional necesario
- Además sin C_1 y C_2 la R total en serie con el cristal es mucho más alta que la R_m degradando el Q_L
- C_1 y C_2 controlan el Q_L y R_1 ajusta la fase de transmisión

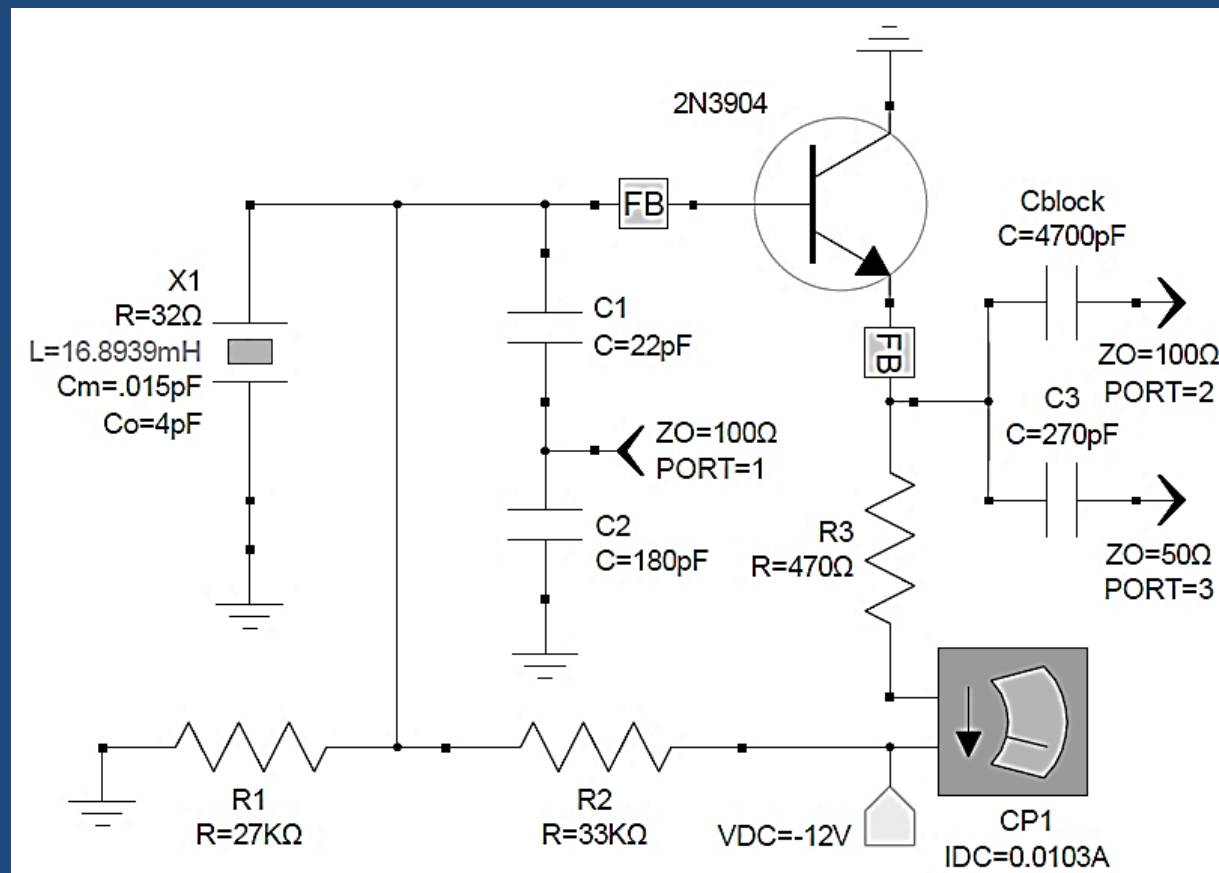
- La R_1 se ajusta de modo que la máxima pendiente de fase de transmisión se produzca cerca ϕ_0
- La inductancia movicional se sintoniza de manera que ϕ_0 se produce a 10 MHz (en la realidad no se puede)
- El Pierce puede ser diseñado para que oscile exactamente en la f de la resonancia serie del cristal, insertando en serie un inductor con una reactancia igual a la serie de C_1 con C_2



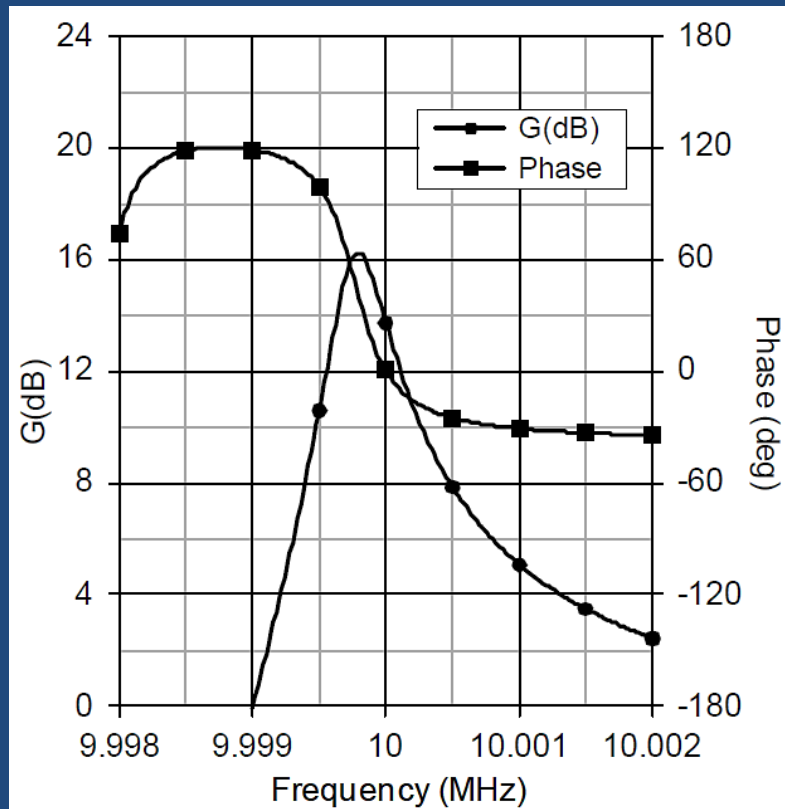
- Se puede evitar el inductor en serie solicitando el cristal con una f de resonancia serie inferior a 10 MHz
- El Q_L de la cascada tiene un pico en 20000
- El Q descargado del cristal $\omega L_m / R_m = 33200$
- Q_L es el 60% del Q descargado

*Se sugiere simular Figure8_8

- Oscilador Colpitts bipolar en 10 MHz
 - El cristal trabaja cerca de la resonancia | |
 - Provee la inductancia para resonar en | | con la serie C_1 - C_2
 - S_{11} y S_{22} en un sistema de 100 ohm son solo -2,8 y -6,0 dB respectivamente por lo que se aplica Randall / Hock



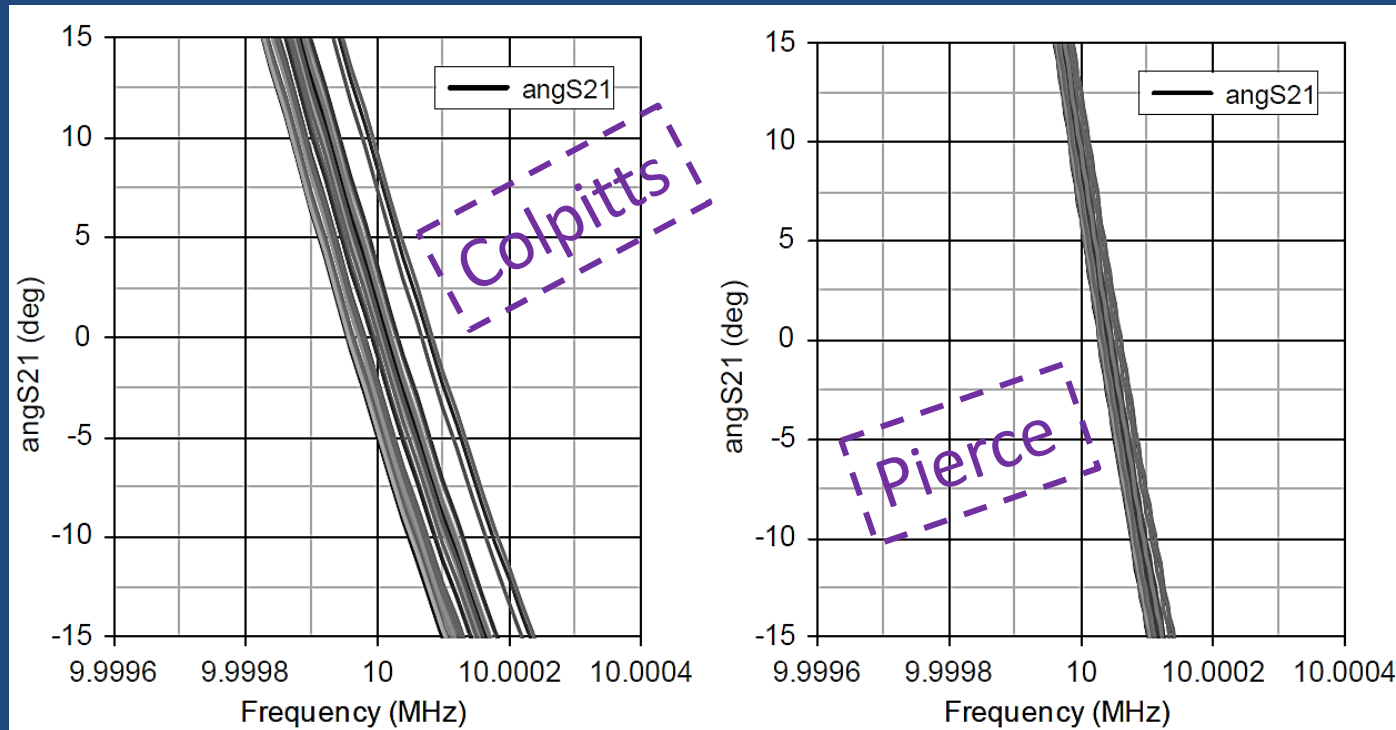
- La L_m se ajustó para que el oscilador resuene en 10 MHz
- El Q_L del circuito es aproximadamente 10000, solo el 50% del Pierce
- El oscilador Colpitts requiere una alta Z en $||$ con el resonador, por lo que un FET es más apropiado que un BJT



- C_1 y C_2 , en $||$ con C_0 cambian la f de resonancia $||$ del cristal
- La C en $||$ con el cristal se llama capacidad de carga del cristal C_L
- Dado que el desplazamiento es bastante grande, el valor de C_L se especifica al solicitar al fabricante la provisión de un cristal para funcionar en modo $||$
- Dos valores estándar de C_L son 20 y 32 pF

- Exactitud en la f de un oscilador a cristal
 - Es lo que se acerca la f de oscilación al valor deseado
 - La precisión es la repetitividad en torno a un valor de f de oscilación. Es opuesta a la dispersión
 - La variación de f en un tiempo < 1 s se conoce como ruido
 - La variación de f en días o más se la conoce como envejecimiento o aging
 - La variación de f en tiempos intermedios se conoce como deriva o drift y se asocia con el arranque, cambios de temperatura y la aceleración mecánica
 - La exactitud se expresa en ppm
 - Por ejemplo un oscilador en 10 MHz que puede variar ± 100 Hz tiene una exactitud de ± 10 ppm
 - El fabricante especifica la exactitud de la f de resonancia de un cristal
 - Los cristales económicos van de ± 50 ppm a ± 100
 - Los de precio moderado tienen una exactitud de ± 10 ppm para una temperatura específica

- Los resonadores de elementos concentrados ofrecen un estabilidad de alrededor de ± 10000 ppm
- Para alcanzar una exactitud de ± 10 ppm se requiere un control estricto del efecto de carga de la etapa de sostenimiento
- Para obtener una exactitud mayor que ± 10 ppm es necesario un buen control de calidad y tener una fluida comunicación con el fabricante de cristales

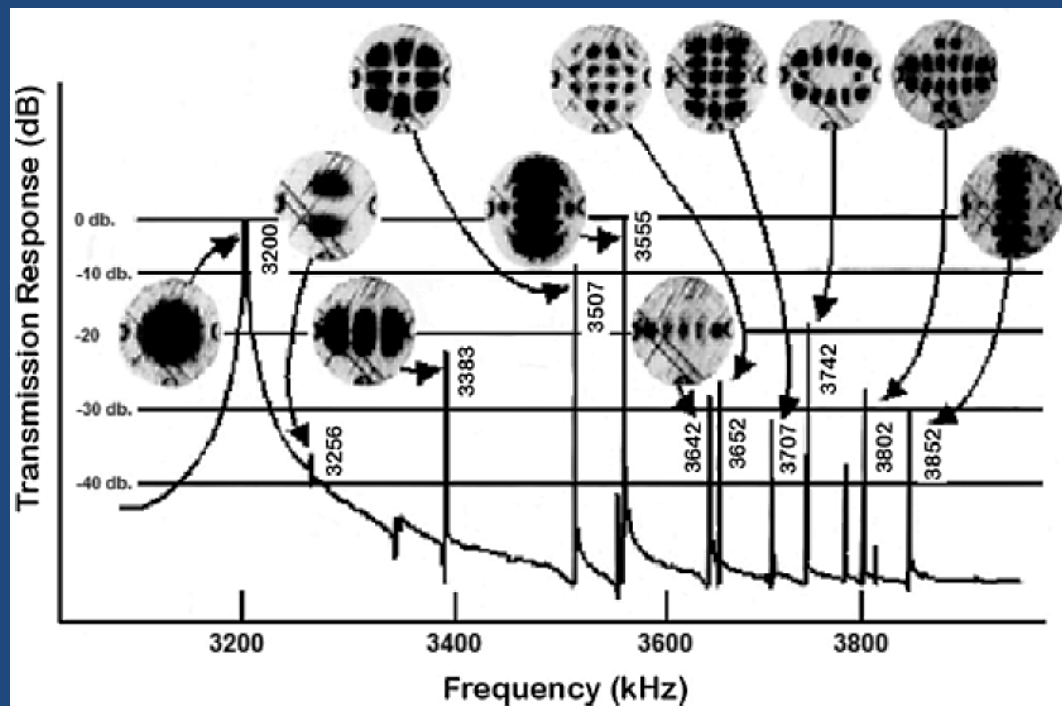


Análisis de Monte Carlo de la fase del circuito de lazo abierto. En el oscilador Colpitts a cristal hubo un $\pm 5\%$ de variación uniforme en C_1 . En el Pierce igual variación en C_1 y C_2

- Efectos de la temperatura
 - Los osciladores a cristal de cuarzo poseen una muy buena exactitud inicial y estabilidad a largo plazo
 - La mayor influencia en la estabilidad de f de un oscilador a cristal es la temperatura de funcionamiento
 - La estabilización de los osciladores a cristal con la temperatura es un arte refinado y maduro
 - TCXO: Temperature Compensated Cristal Oscillator
 - Hoy se puede llegar a $\pm 0,2$ ppm entre -20 y 70°C con un encapsulado de $3 \times 5 \times 7$ mm, alimentación 5 V y consumiendo poca corriente
 - OCXO: Oven Controlled Cristal Oscillator
 - Mejoran a los TCXO

- Nivel de excitación de un resonador de cristal
 - Cuando aumenta la excitación de un cristal, la f de oscilación aumenta en los cortes AT y disminuye en los cortes SC
 - Una excitación excesiva puede superar el límite elástico y fracturar a un cristal
 - El nivel de excitación se debe limitar a 2 mW o menos para f mayores que 100 kHz
 - Para resonadores de menor frecuencia los niveles deben ser menores aún
 - Un nivel bajo reduce la potencia disponible pero hace que la performance ante el envejecimiento sea mejor
 - Un Q_L cargado alto con un nivel bajo de potencia de salida mejora la performance de ruido de fase SSB a frecuencias cercanas a la portadora, pero el ruido de fase es malo a frecuencias lejanas de la portadora
 - Leeson $S_\phi(\omega_m) = S_{\Delta\phi} \left[1 + \left(\frac{\omega_0}{2Q\omega_m} \right)^2 \right]$ donde $S_{\Delta\phi} = FkT/P_s$
 - En general, el ruido de fase de los osciladores típicos a cristal se aplanan más rápidamente que en los osciladores de alta potencia, de componentes concentrados y resonadores distribuidos (LT)

- Modos espurios de un resonador de cristal
 - La figura muestra la topografía de rayos X de un cristal corte AT de 3200 kHz en fundamental, excitado en varios modos de resonancia espurios
 - Las zonas oscuras representan las zonas de máxima amplitud
 - Las respuestas de modo espurio de 10 dB debajo de la deseada se consideran aceptables
 - El control de modos espurios en filtros hechos con cristales es mucho más crítico



- La topografía del modo fundamental muestra como el anillo grueso del resonador mesa invertido perturba solo marginalmente la resonancia
- La relación entre el diámetro de la mancha central y el diámetro de la oblea se usa para controlar los modos espurios

- Envejecimiento del resonador a cristal
 - El aging se expresa en ppm por día, mes o año
 - Es acumulativo a un ritmo exponencial con velocidad de cambio decreciente con el tiempo
 - Una causa inicial muy importante es la redistribución de materia extraña en la oblea o electrodos por la vibración
 - La aceleración en la superficie del cristal por la vibración es altísima
 - El material redistribuido reduce la masa central de la oblea aumentando la f de oscilación

- Otras causas de envejecimiento incluyen a
 - Pérdidas del recinto del encapsulado
 - Estrés de los elementos de montaje y electrodos
 - Absorción de humedad
 - Corrosión del electrodo
 - Liberación de gases de los materiales adentro del recinto del encapsulado
- El mejor comportamiento se obtiene con un nivel muy bajo de excitación $10\ \mu\text{W}$, pero esto degrada la estabilidad a corto plazo (phase noise)
- Los fabricantes hacen envejecimiento acelerado con un burn-in a altas temperaturas
- En alta producción se puede obtener un envejecimiento de 0,01 ppm/día
- Con un diseño cuidadoso, control de calidad y selección de dispositivos se puede llegar a 0,0001 ppm/año
- El tipo de sellado puede influir
- La soldadura en frío es mejor que la caliente
- La soldadura ya no se usa para aplicaciones de alta performance por que es problemático el control de calidad y el envejecimiento resulta pobre

- Osciladores a cristal en modo fundamental
 - El primer oscilador con cristal de cuarzo se atribuye a Cady alrededor de 1921
 - El objetivo en el diseño de un oscilador es desarrollar el acoplamiento y la etapa de sostenimiento para minimizar la influencia del dispositivo activo y el cambio de temperatura ambiente sobre la estabilidad
 - Se analizarán ejemplos de osciladores a cristal en modo fundamental, todos con el mismo cristal
 - Corte AT, encapsulado HC-49/U
 - Q descargado 62900
 - f de resonancia serie en 9600 kHz y || en 9620 KHz
 - $IL = 0,95$ dB

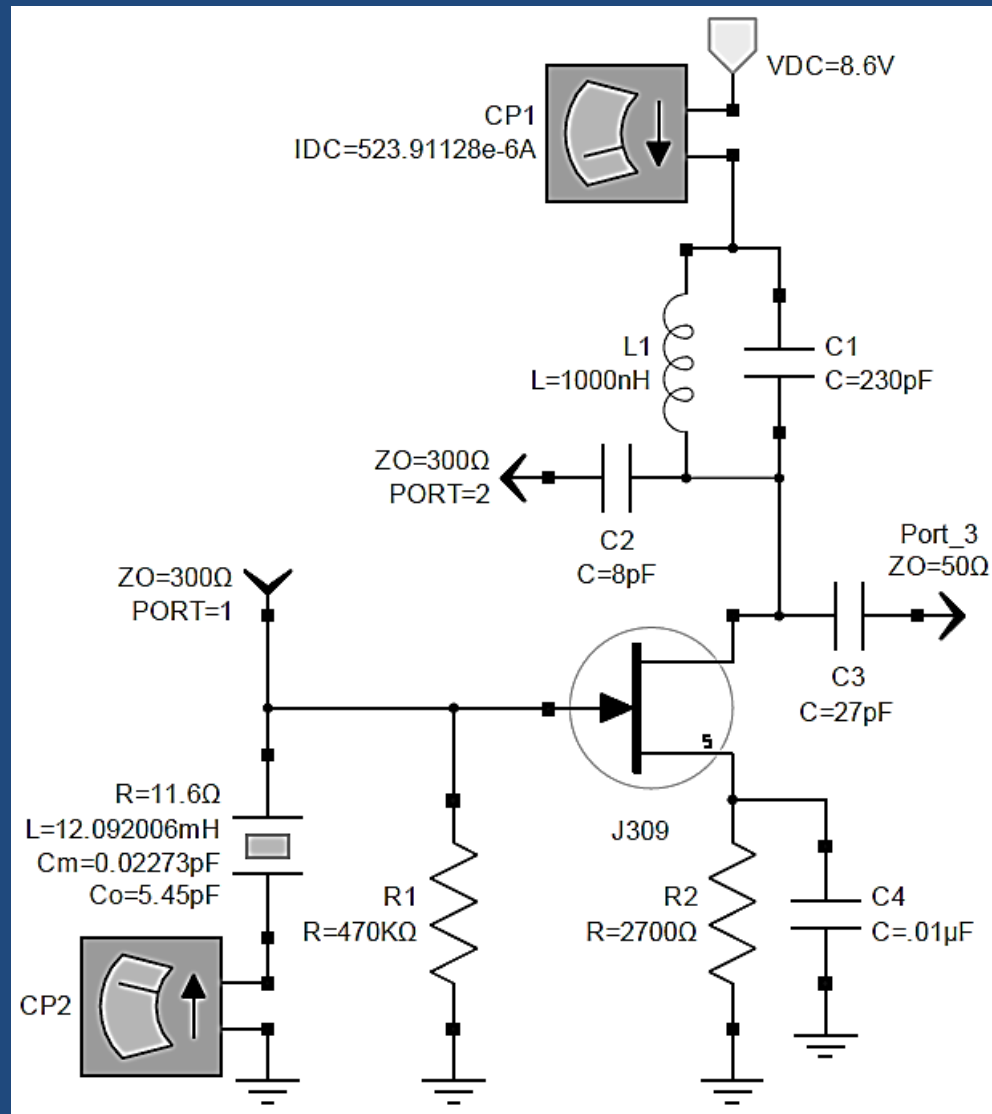
– Además en todos los ejemplos

- Tensión de alimentación 8,6 V
- La corriente de los dispositivos se ajustaron para $P_o \approx 3$ dBm
- Margen de ganancia de 5 a 8 dB
- Q_L tan alto como sea posible
- Dispositivo bipolar → Philips QMMBT3904
- Dispositivo FET → On Semiconductor JFET Canal N J309
- Siempre que se pueda, terminaciones de 50 ohm

– Simulación

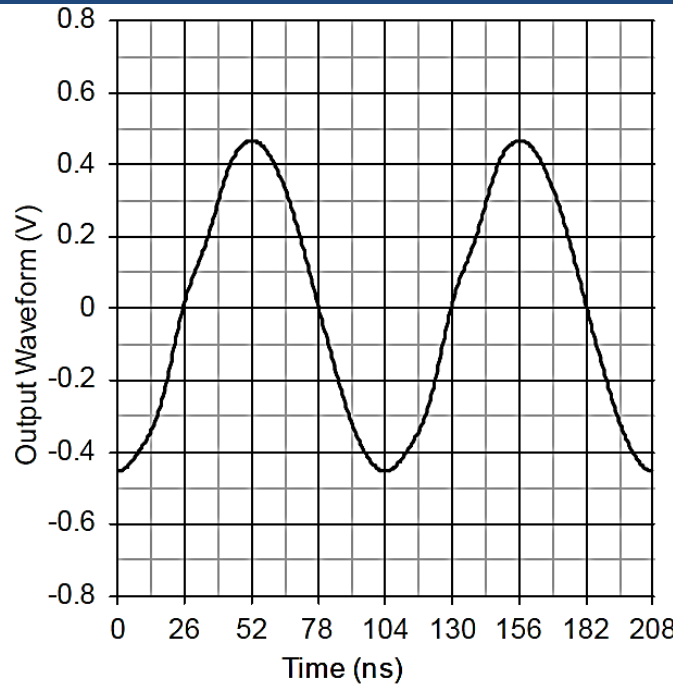
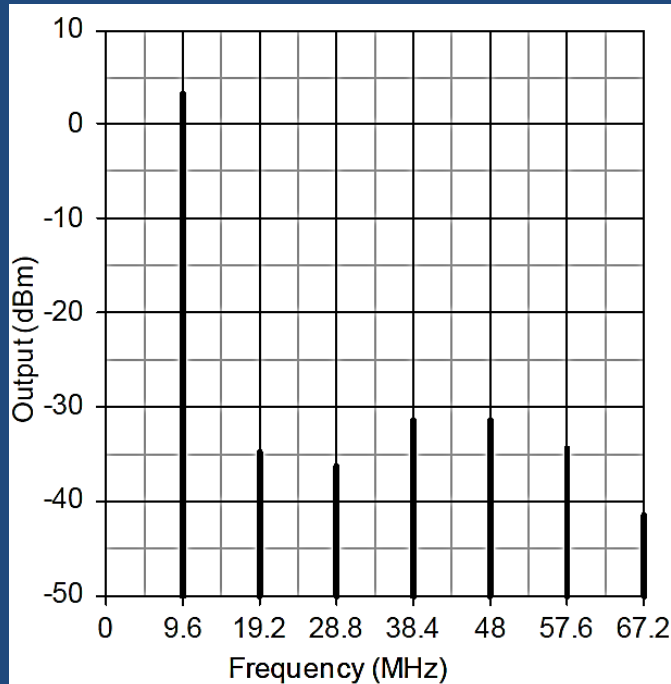
- CC
- Lineal
 - Se analizan las condiciones de Barkhausen
- Harmonic Balance (Harbec)
 - Predice espectro y forma de onda en régimen

• Oscilador Miller a cristal con JFET



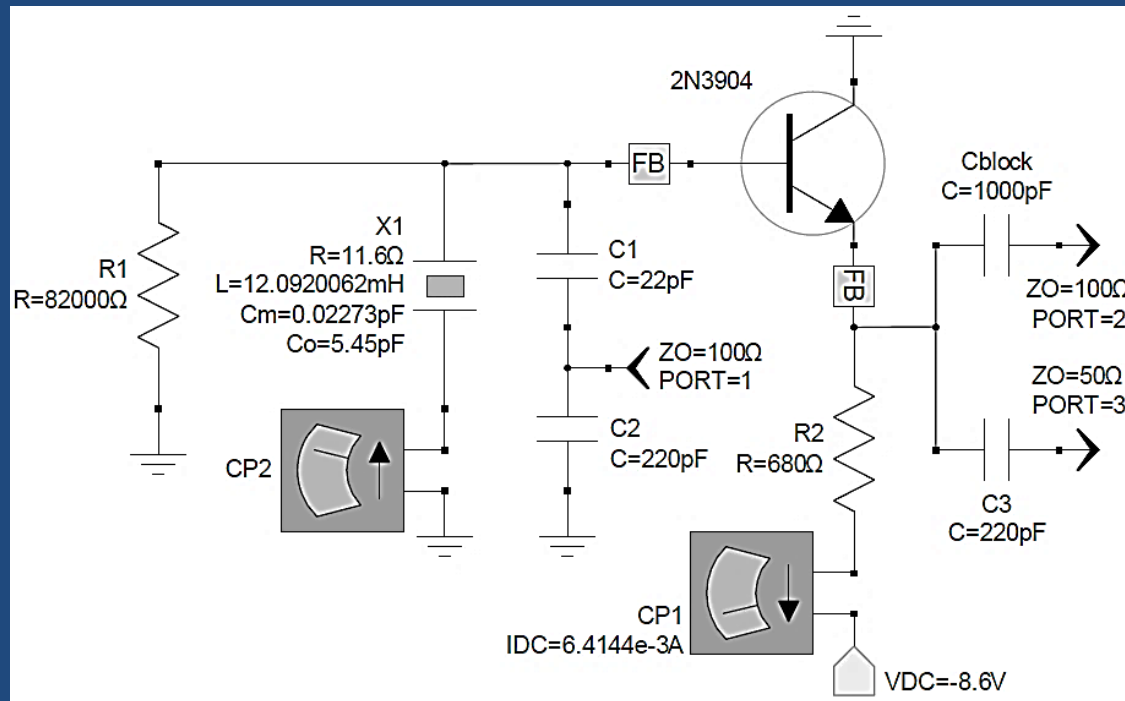
- La f de resonancia de L_1 y C_1 está por arriba de f_0 por lo que el tanque aparece inductivo
- Esta inductancia manejada por la resistencia de salida del JFET desfasa casi 90° , C_2 y el cristal aporta los 90° faltantes
- El capacitor C_3 aumenta impedancia de carga a 7,59 kohm
- Como funciona entre las f serie y $||$ del cristal el Miller es catalogado como un oscilador en modo $||$
- La retroalimentación la hacen C_2 y la capacidad de Miller
- Se han seleccionado Z_0 de 300 ohm pero aún así la adaptación es pobre por lo que se aplica Randall/Hock

- El MG del lazo abierto es solo 2,5 dB menor que 5 – 8 dB deseado
- El Q cargado es muy pobre, solo el 3,4% de Q del cristal
- Dado que la C de Miller depende del dispositivo la estabilidad del circuito es pobre
- No se recomienda para nuevos diseños
- La onda de salida es limpia con bajo contenido armónico
- Tiene alto η conversión CC \rightarrow RF, 21%, el más alto de todos los ejemplos ya que L_1 , C_1 y C_3 operan de forma parecida a un amplificador Clase E



- Con BJT también funciona por encima de unos pocos MHz, pero la baja Z_{in} , ya marginal en los JFET, lo hace aún más cuestionable para los bipolares

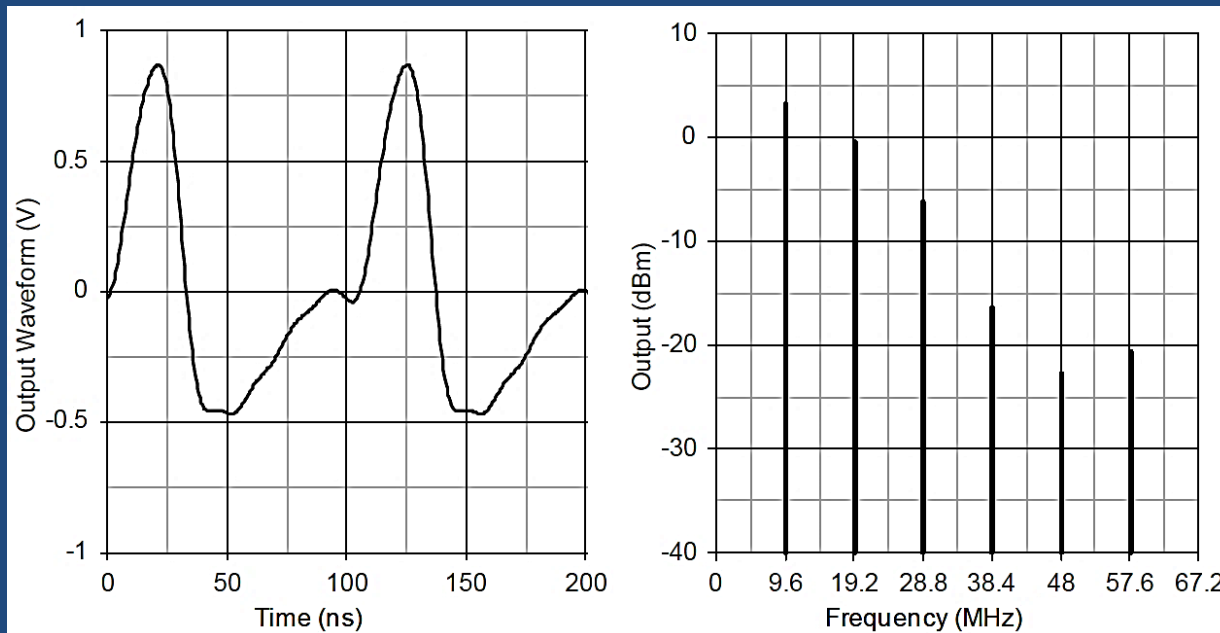
- Oscilador Colpitts a cristal con BJT



- Es una topología común en osciladores a cristal
- Fácil de diseñar y tiene performance adecuada para aplicaciones no críticas
- Adaptación y Q cargado pobres
- Difícil hacer coincidir máx. pendiente de fase con ϕ_0

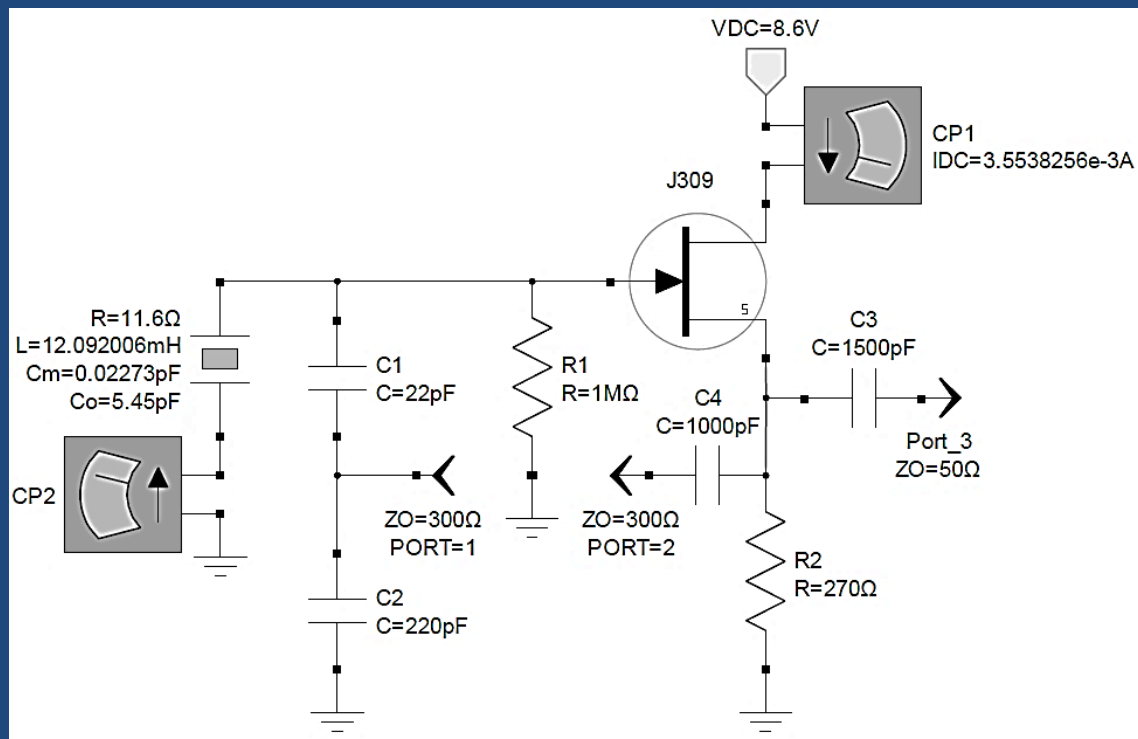
- La estabilidad de la topología no es buena por lo que se usa una perla de ferrite en la base
- Una perla de ferrite en el emisor mejora la adaptación de la cascada
- El cristal trabaja por sobre la f de resonancia serie como un inductor que resuena en $||$ con la serie de C_1 y C_2
- La capacidad de carga del cristal es aprox. la serie de C_1 y C_2 , 20 pF

- Se selecciona una Z_0 de 100 ohm pero igual hay que usar Randall /Hock
- El MG es mucho mayor que el deseado de 5 a 8 dB lo que justifica una mayor estabilización con las perlas de ferrite
- Q cargado es 14200 el 23% del Q del cristal
- Espectro rico en armónicos, el 2do esta solo a 3,7 dB de la fundamental
- Se podría cargar aún más al amplificador y duplicar el η y P_o pero la onda de salida sería casi impulsiva
- El alto contenido armónico esta soportado por el transistor que tiene una f_T 30 veces la f de oscilación



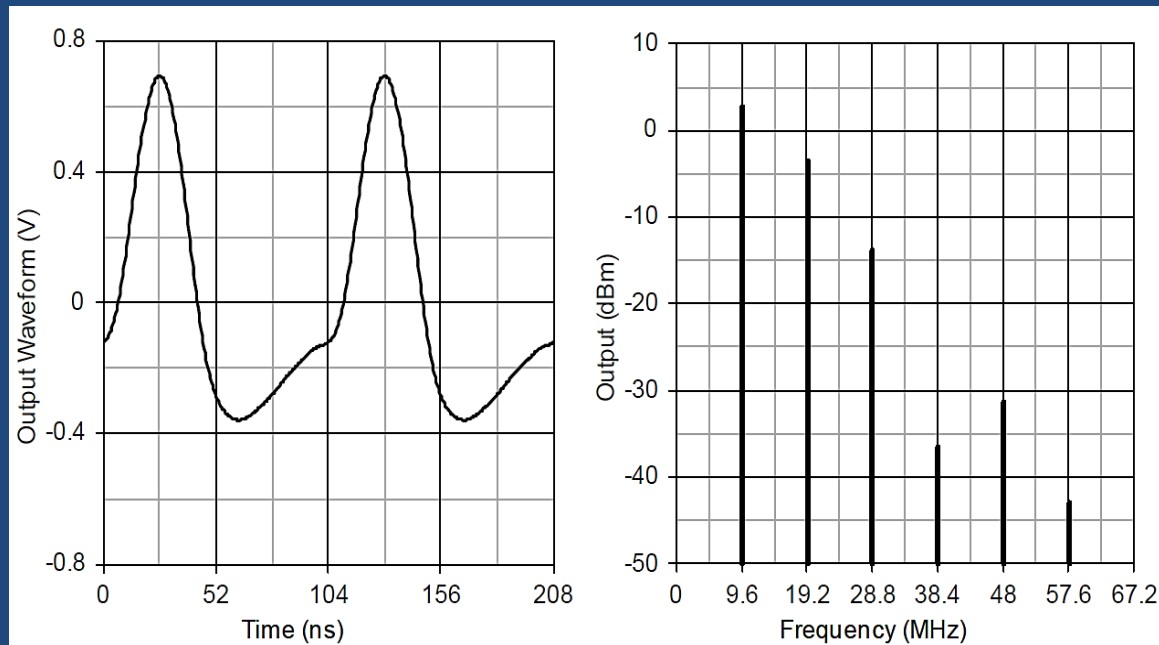
- En este ejemplo la disipación del cristal es 775 μ W, más elevada que en la mayoría de los otros ejemplos

- Colpitts a cristal con JFET
 - Para una performance óptima el Colpitts necesita una alta impedancia en $||$ con el cristal
 - Mejora substancialmente reemplazando el BJT por un JFET
 - La Z_0 óptima es más elevada que para el BJT, 300 ohm
 - Para este ejemplo, la adaptación es mejor que con el BJT, pero aún se beneficia con Randall/Hock



- El margen de ganancia está en el extremo superior de la banda deseada de 5 a 8 dB
- Si los modos espurios son un problema se aconseja agregar perlas de ferrite en serie con la puerta

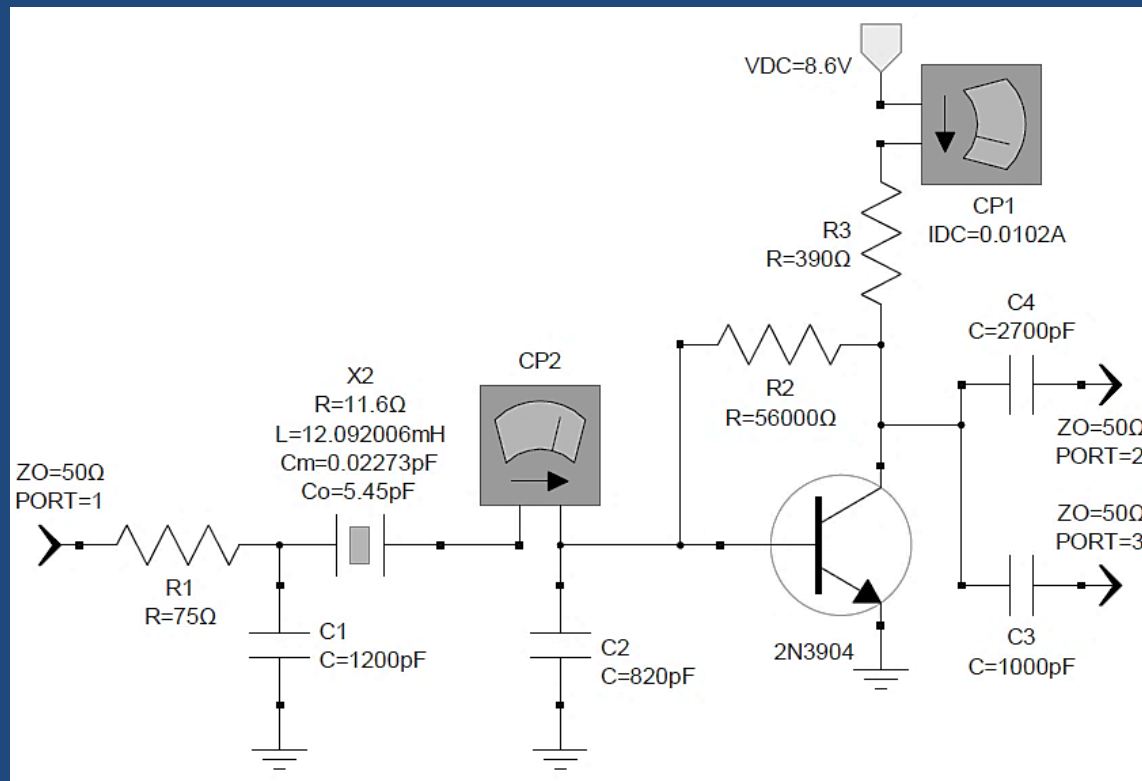
- El Q cargado es 42000 un 67% del Q del cristal, mejora mucho al BJT
- La carga de 50 ohm está acoplada completamente al surtidor
- El segundo armónico está 6,3 dB por debajo de la fundamental
- La forma de onda no es senoidal, lo que se corresponde con un espectro rico en armónicos
- La eficiencia en la conversión de potencia de CC a RF es algo mejor que en la versión bipolar del oscilador Colpitts



- La disipación de potencia en el cristal para este ejemplo es 123 μ W, que se encuentra entre las más bajas entre todos los ejemplos.

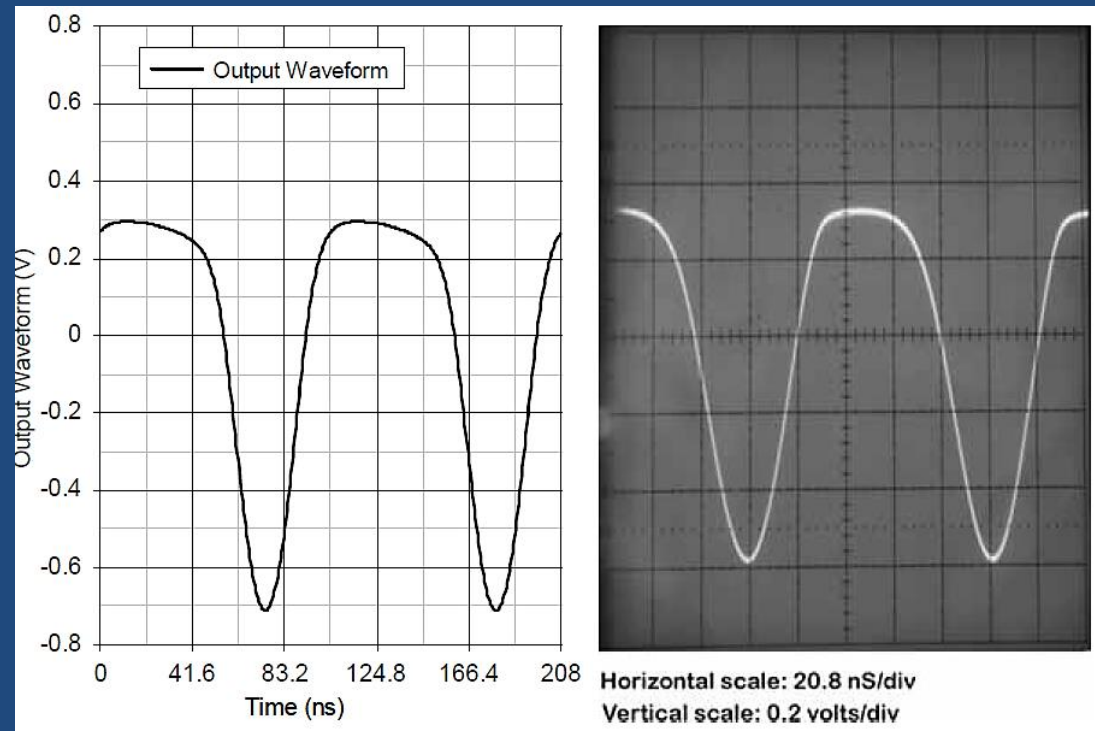
*Se sugiere simular Figure8_20

• Oscilador a cristal Pierce bipolar



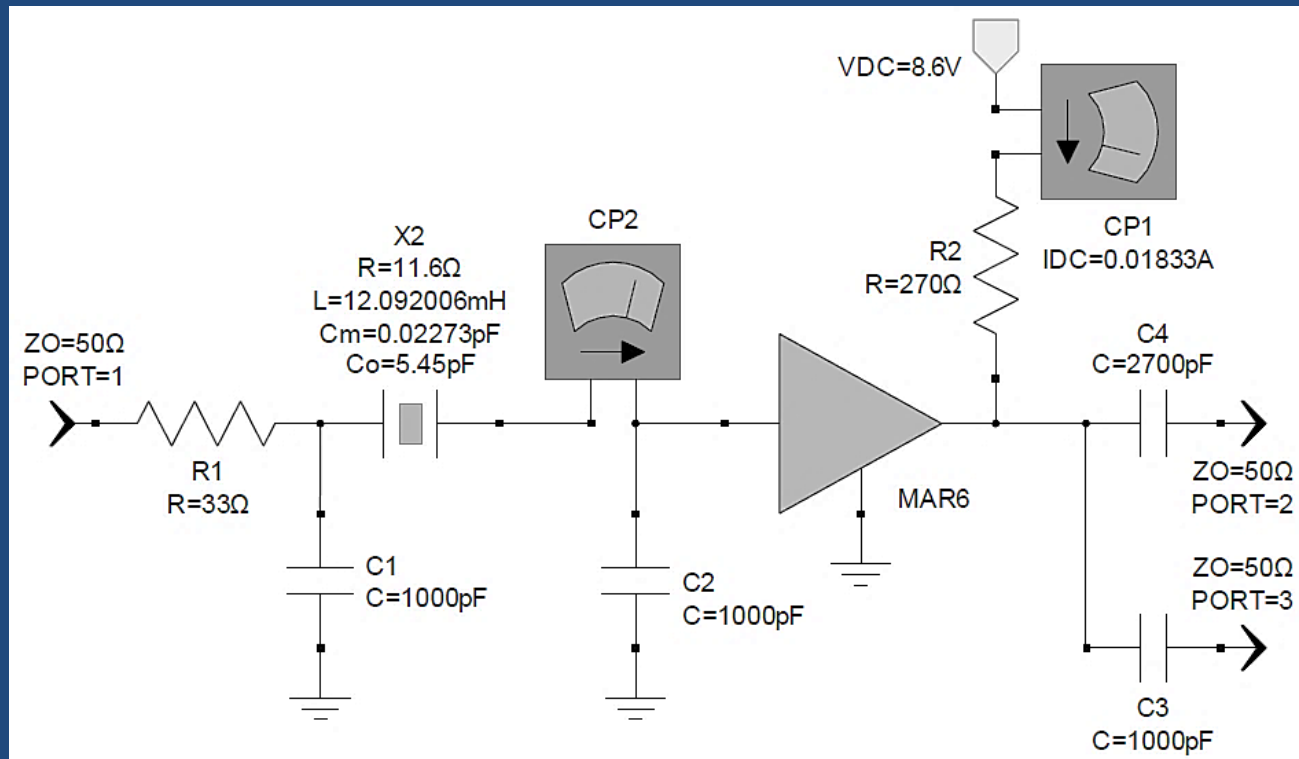
- C_1 y C_2 acoplan al cristal reduciendo las impedancias efectivas de entrada y salida del amplificador aumentando el Q cargado
- La Z_{out} del transistor con C_1 y R_m con C_2 agregan la fase para llegar a 360°
- R_1 ajusta el desplazamiento de fase para que la pendiente máx. coincida con Φ_0

- Los valores de S_{11} y S_{22} son mejores que -10 dB referenciados a 50 ohm por lo que no es necesario la corrección de Randall/Hock
- El MG está apenas encima de 5 dB
- El Q cargado del Pierce bipolar es 52100, 83% del Q descargado del cristal

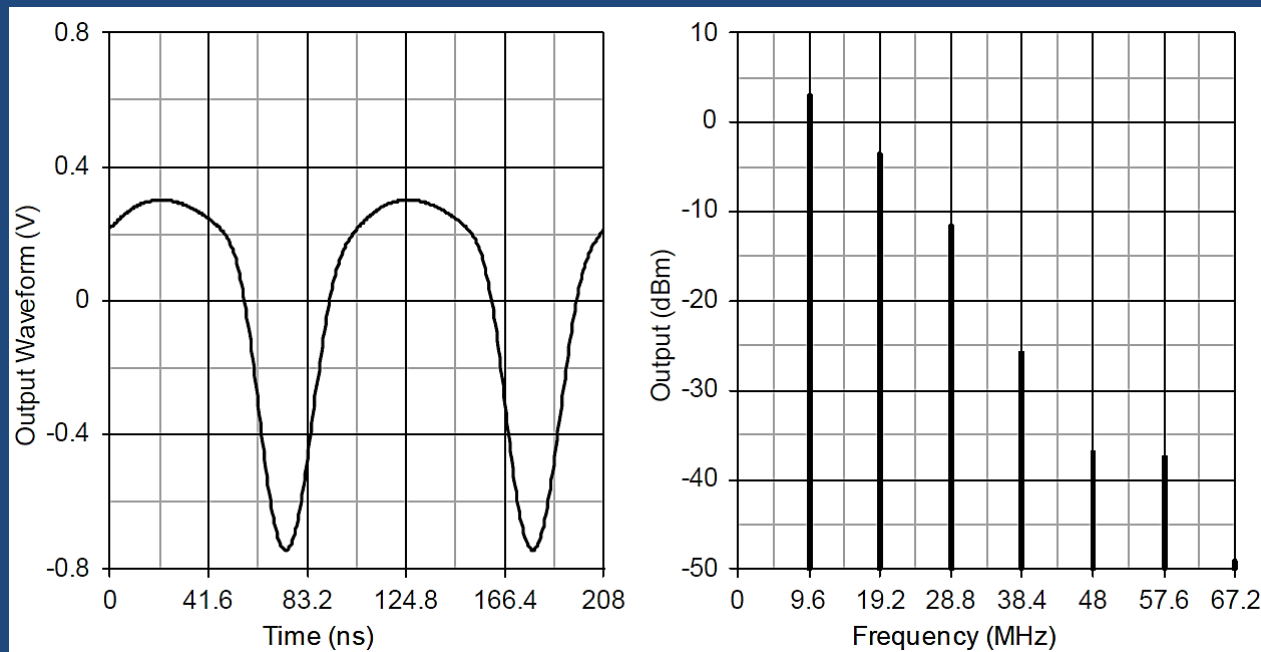


- Una búsqueda agresiva del Q aumentando $C1$ y $C2$ incrementa la IL del cristal y reducen el MG ya que $Q_U = \frac{Q_L}{1 - 10^{-IL/20}}$
- La capacidad de carga del cristal es aproximadamente la serie de $C1$ y $C2$, 487 pF
- Esta capacidad elevada hace que f se aproxime a la f de resonancia serie del cristal, apenas 209 Hz por encima
- Los 50 ohm de carga quedan acoplados plenamente con $C3$
- El 2do y 3er armónico están 6,4 y 17,8 dB debajo de la fundamental
- La forma de onda medida es ligeramente más sinusoidal lo que resulta en un pico negativo menor que la simulada

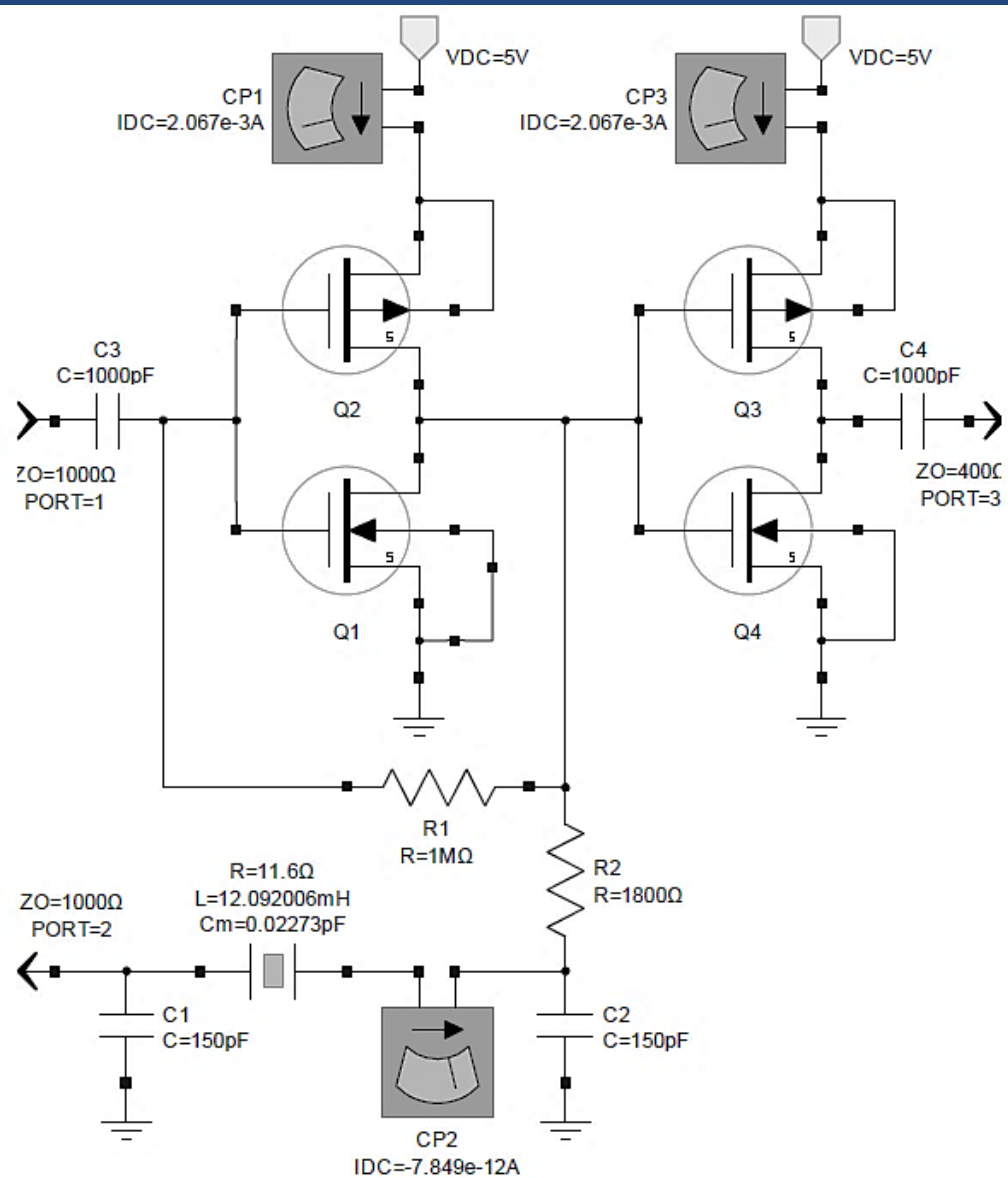
- Oscilador a cristal Pierce con MMIC
 - Es similar al Pierce bipolar salvo el MMIC MAR 6
 - Las ventajas del MMIC son
 - Ganancia estable con la temperatura
 - Ganancia casi plana desde 200MHz (20 dB) a 2GHz (12 dB)
 - Repetitividad y estabilidad mejorada
 - Adaptación a 50 ohm es mejor que -10 dB hasta 1 GHz



- La realimentación resistiva degrada la NF a 3 dB
- El Q cargado es menor y la disipación del cristal es superior que la forma bipolar
- La excelente adaptación es sólo un beneficio marginal para un oscilador, por lo que este circuito ofrece pocas ventajas respecto la forma bipolar discreto
- Es una alternativa fácil y útil de diseño para cuando se desea usar un MMIC

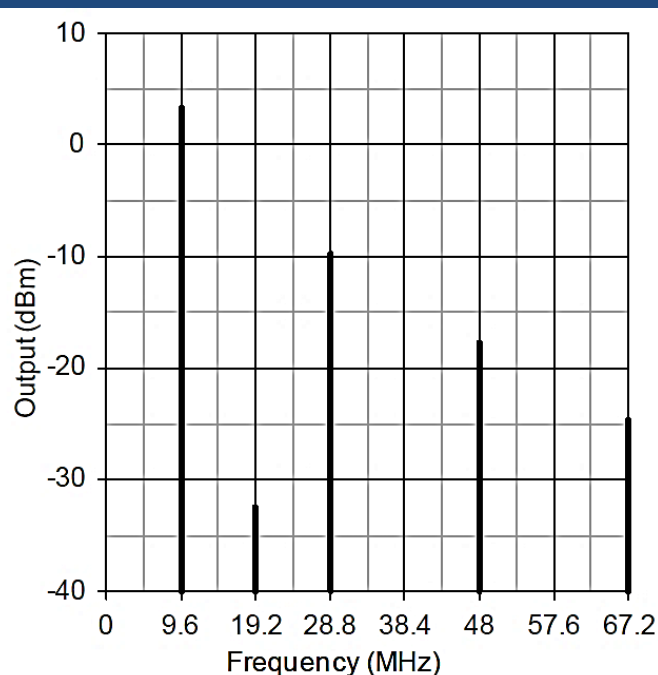
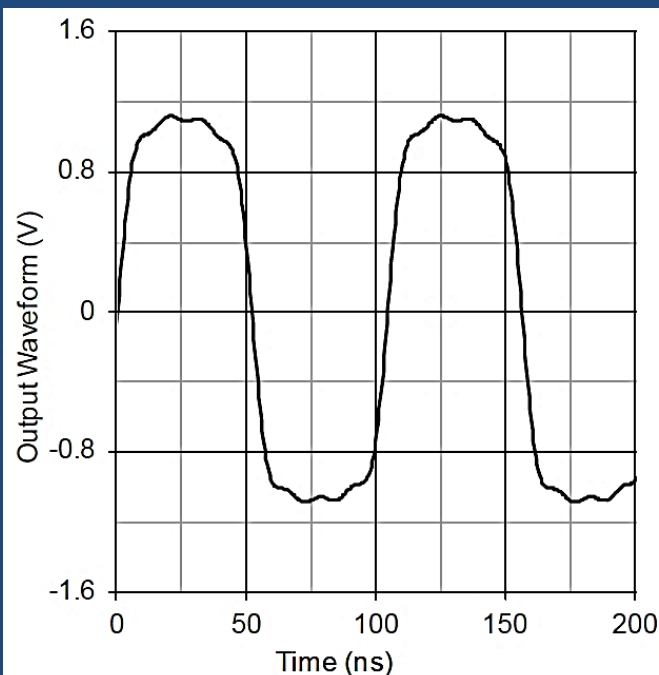


• Oscilador Pierce a cristal con puerta CMOS inversora



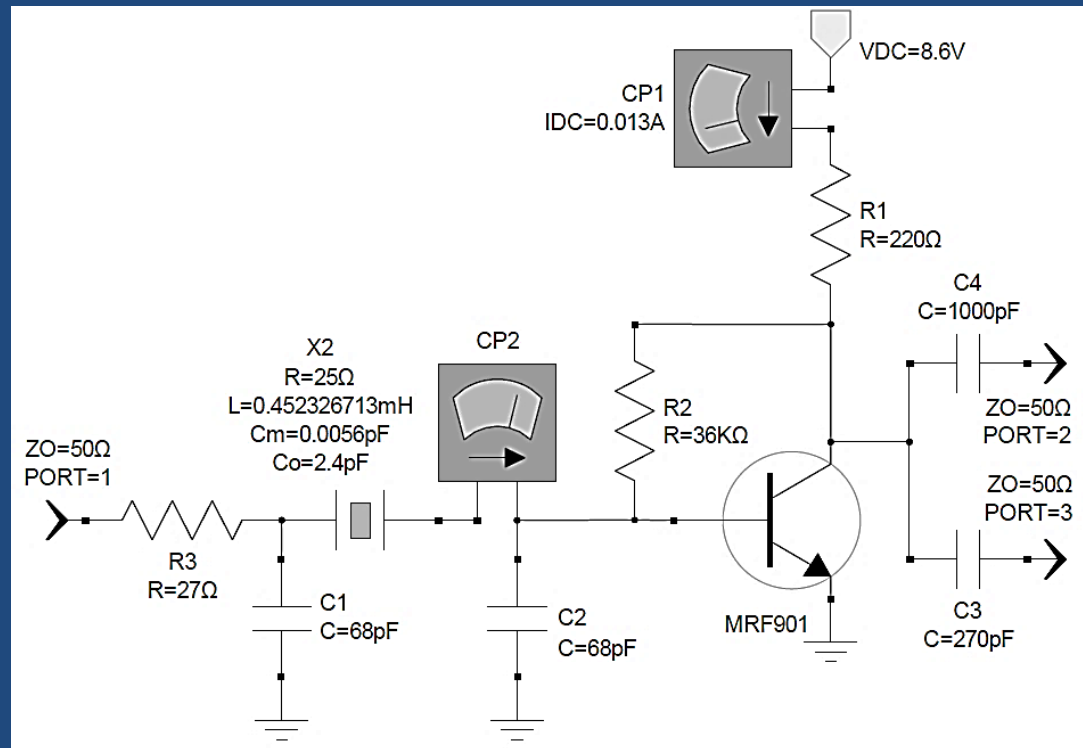
- Se usa una puerta extra para aislar la salida y facilitar la entrega de 3 dBm a una carga de 400 ohm
- Una R de 1 Mohm polariza la puerta en su zona activa
- Se usa una Z_0 de 1000 pero igual es necesario Randall/Hock
- Randall/Hock predice un $MG = 6$ dB
- El Q cargado vale un impresionante 54600, 87% del Q del cristal sin carga
- Si la R_m del cristal no está estrictamente controlada se usan valores más pequeños de C_1 y C_2

- Esto eleva la f de funcionamiento
- En este caso está 1457 Hz por encima de la f de resonancia serie
- Al Pierce se lo considera un oscilador a cristal en modo serie por lo que su f es próxima a la f de resonancia serie del cristal
- Sin embargo en este caso la C efectiva de carga de 75 pF es apenas 2,3 veces mayor que el valor estándar de 32 pF
- Los valores pequeños de C_1 y C_2 dan como resultado una mayor sensibilidad a sus valores, como sucede en un oscilador Colpitts, en vez de la típica baja sensibilidad de un oscilador Pierce

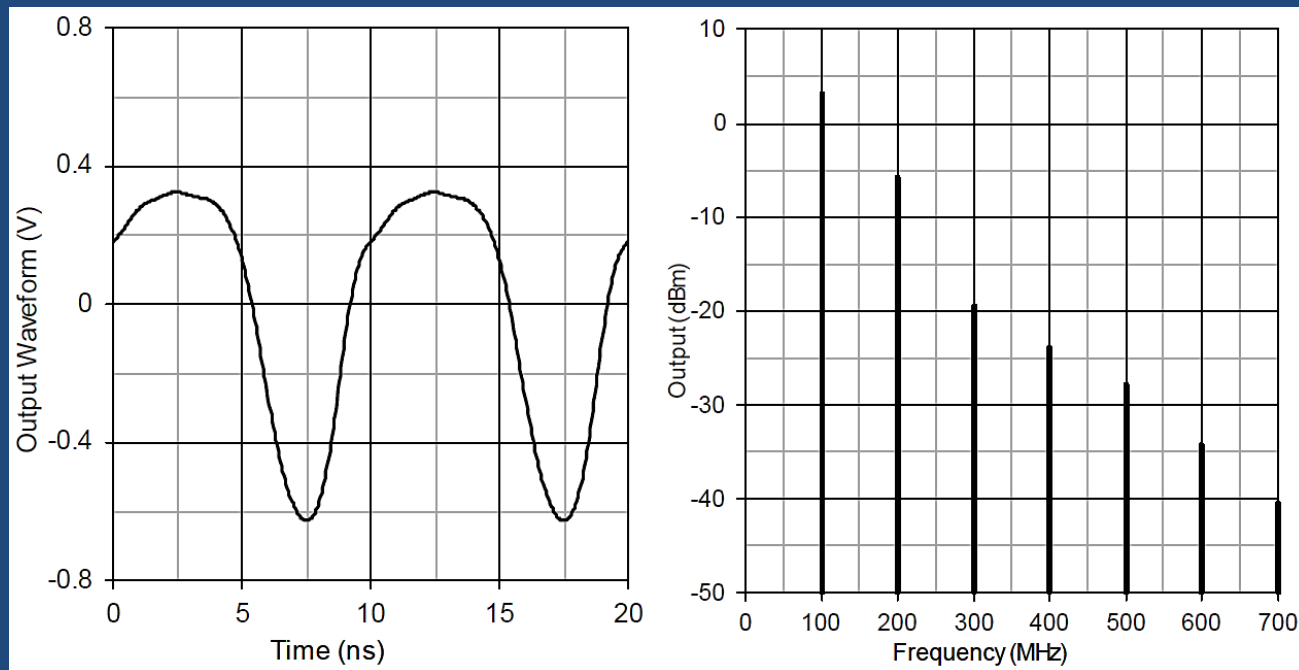


- La tensión de salida es mayor porque la carga es de 400 ohm
- La forma de onda simétrica disminuye los armónicos pares (simetría de $\frac{1}{2}$ onda)

- Oscilador bipolar Pierce con cristal mesa invertida
 - El cristal tiene los parámetros típicos de un mesa invertido de 100 MHz
 - $R_m = 25 \text{ ohm}$, $L_m = 0,452326713 \text{ mH}$, $C_m = 5,6 \text{ fF}$, $C_o = 2,4 \text{ pF}$ y $Q = 11400$
 - Básicamente es idéntico al Pierce con corte AT excepto los valores más pequeños de los C de acoplamiento y un dispositivo con mayor f_T (el MRF901 tiene una $f_T = 4\text{GHz}$)

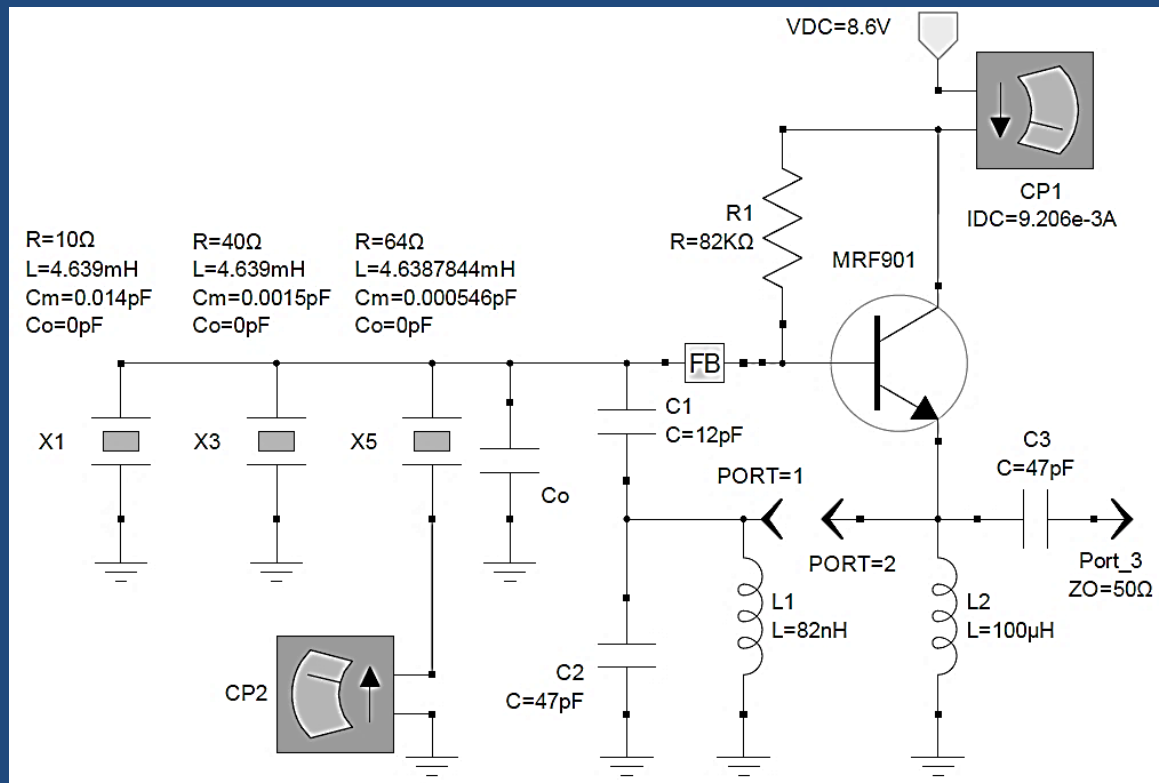


- El Q cargado de este ejemplo es 37% del Q descargado del cristal tiene los parámetros típicos de un mesa invertido de 100 MHz
- La disipación del cristal 531 μW
- La forma de onda es similar a los anteriores Pierce bipolares con recorte asimétrico en el pico positivo



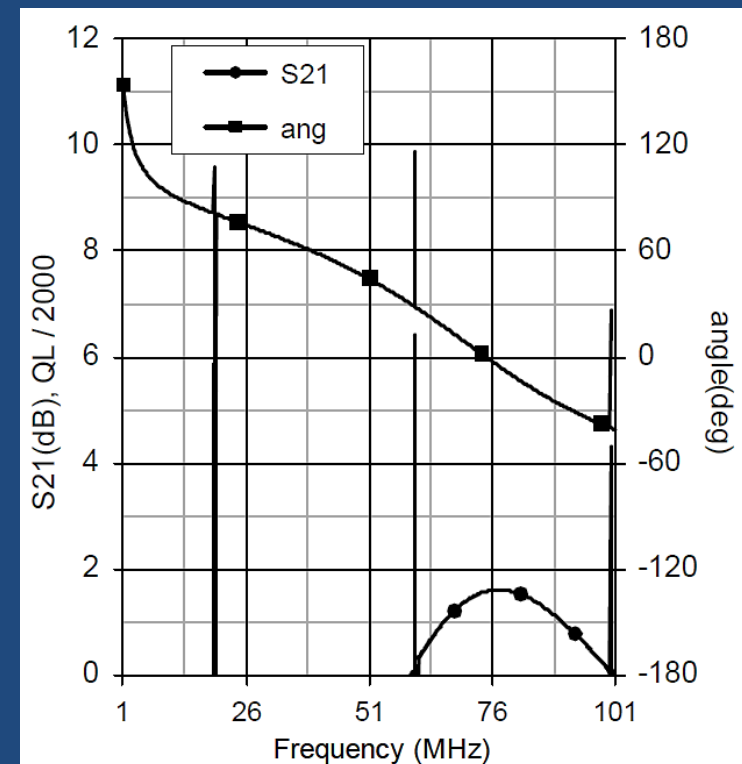
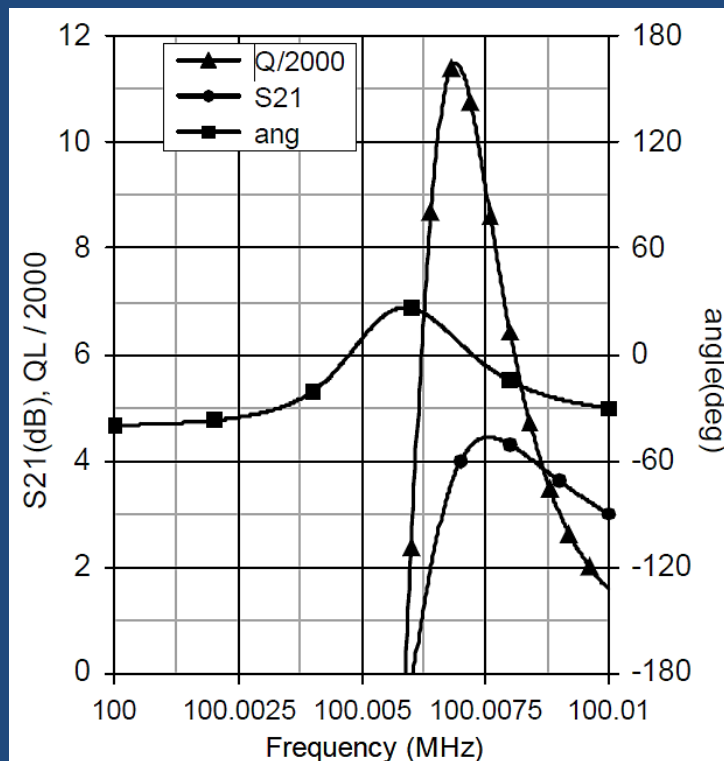
- Osciladores a cristal en modo sobretono
 - En los siguientes ejemplos se considerará
 - Encapsulado HC-49/U
 - $C_0 = 4,55$ pF capacidad estática medida
 - Para el 5to sobretono
 - $|L| = 4,3$ dB
 - f de resonancia serie 100,005 MHz
 - f de resonancia $||$ 100,011 MHz
 - Con estos datos $C_m = 0,546$ fF, $L_m = 4,66387844$ mH y $R_m = 64$ ohm
 - El Q descargado del cristal es 45500
 - El oscilador en modo sobretono no solo debe satisfacer los criterios de oscilación sino que no debe satisfacerlos para la fundamental y los otros sobretonos
 - Se usa un modelo SPICE de Motorola del transistor bipolar MRF901, con $f_T = 4$ GHz

- Oscilador Colpitts bipolar a cristal en sobretono
 - Su funcionamiento es parecido a su equivalente en modo fundamental
 - El $||$ de L_1 y C_2 se comporta inductivamente para f menores a la del sobretono deseado lo que asegura que no haya desfasaje de 0° para la fundamental u otro sobretono (resuenan a 81 MHz)
 - Se han incluido los modelos de cristal para el modo fundamental y el 3er sobretono. C_0 es común a todos los modelos

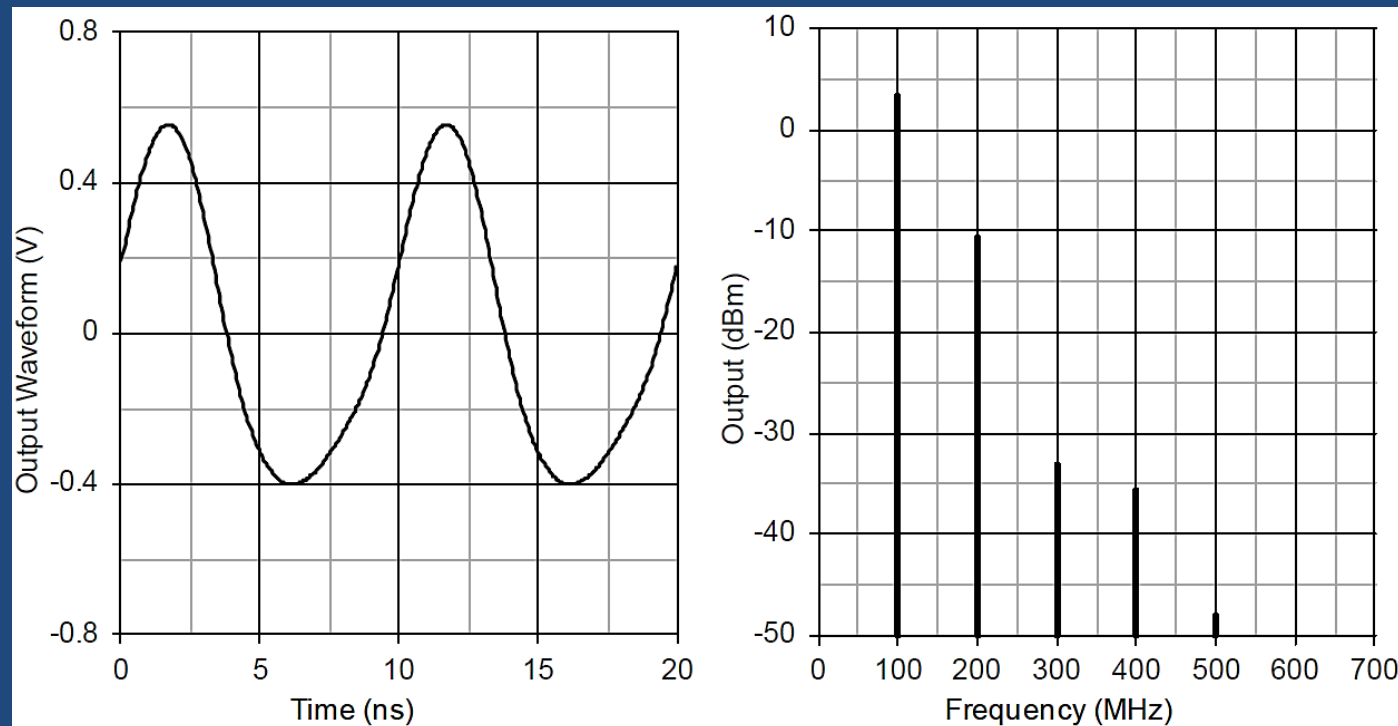


- No es necesario incluir los sobretonos impares mayores al 5to ya que la ganancia cae con la f
- Tampoco se modelan los sobretonos pares porque para ellos el efecto piezoeléctrico de cristal tiene efecto nulo
- L_2 solo para simular

- Para el 5to sobretono Φ_0 coincide con la máxima pendiente de la fase
- Parece un diseño exitoso de un oscilador, sin embargo hay que tener en cuenta el barrido de banda ancha
- Se observa la fundamental en 20 MHz, el 3er sobretono en 60 MHz y el 5to en 100 MHz
- Si bien en todos la ganancia es mayor que 0 dB también se observa que el criterio de oscilación solo se satisface para el 5to sobretono

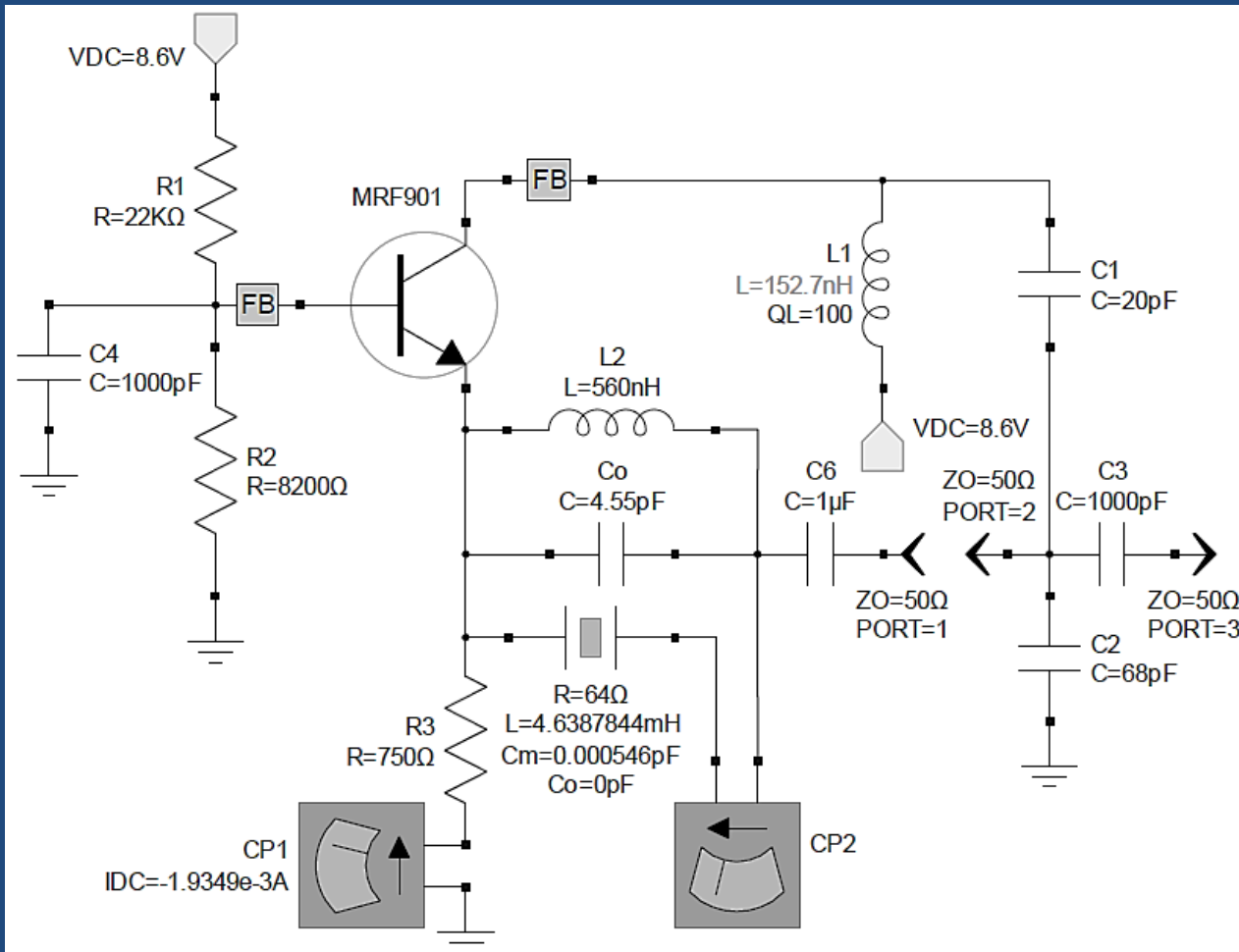


- Dado el bajo MG, bajo Q cargado y posibles modos de funcionamiento espurio el oscilador Colpitts a cristal por sobretono no es una topología aconsejable
- Observe que ocurre un suave cruce por 0° , en 75 MHz no asociado con alguna resonancia del cristal con un MG de 1,7 dB
 - Fuera de las f de resonancia los cristales, la rama movicional tiene alta impedancia, salvo el efecto de C_0
 - C_1 , L_1 y C_2 forman el resonador que puede producir este modo espurio



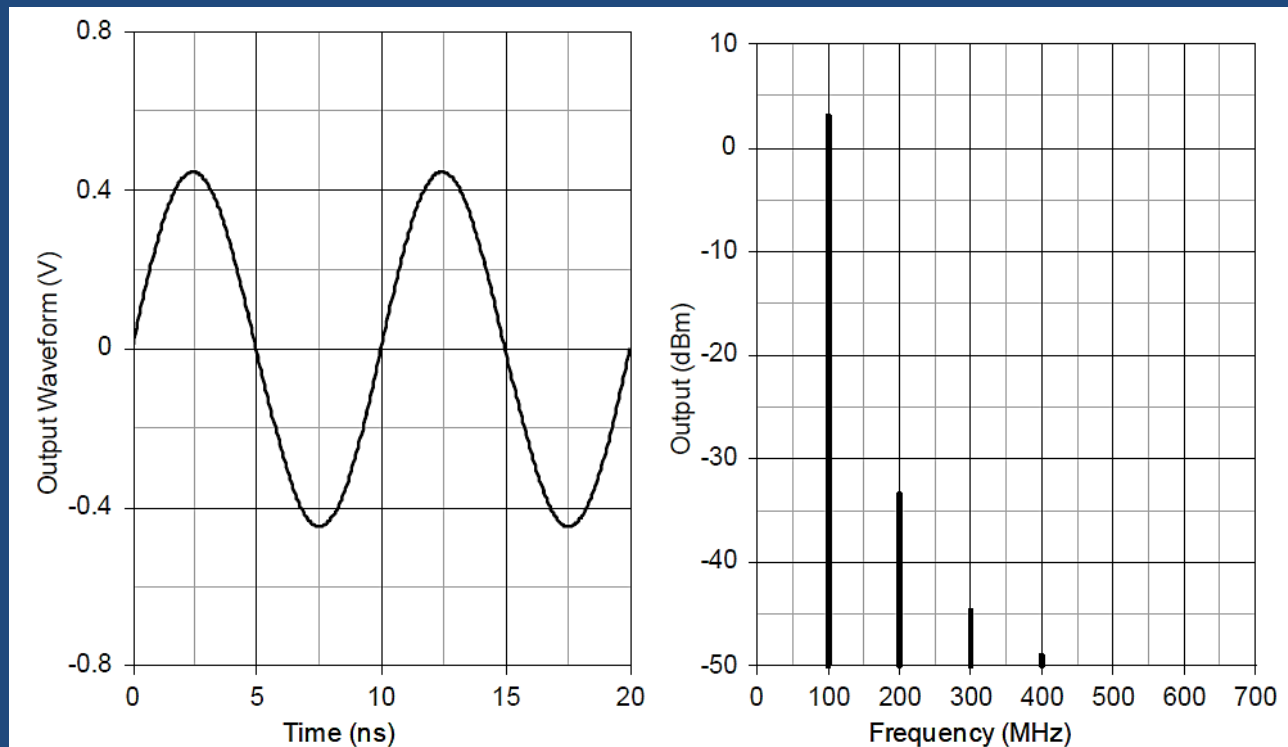
*Se sugiere
simular
Figure8_38

- Oscilador Butler bipolar BC a cristal en 5to sobretono
 - El amplificador es no inversor y el tanque L_1 , C_1 y C_2 transforma la alta Z de colector a la baja de emisor
 - La rama movicional del cristal cierra el circuito de realimentación proveyendo la selectividad y pendiente necesaria

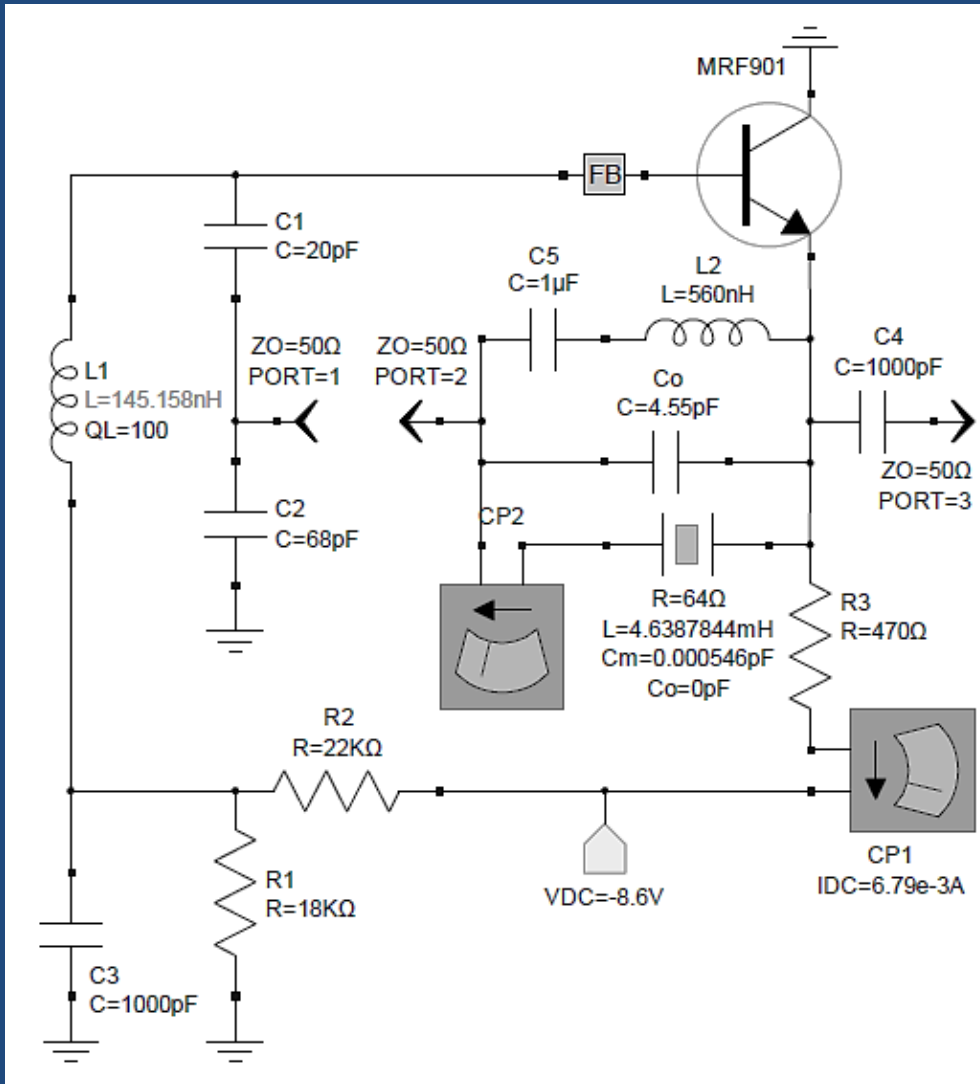


- L_1 ajusta la fase para que la oscilación ocurra exactamente en la f de resonancia serie del cristal
- El tanque además evita que exista un MG positivo para sobretonos no deseados
- L_2 resuena con C_0 su valor no es crítico
- L_2 mejora la respuesta del lazo

- Esta topología necesita usar perlas de ferrite o resistencias en serie con la base y el colector para garantizar la estabilidad en las frecuencias de UHF
- La simulación muestra que la adaptación es buena, el MG vale 4,6 dB, el Q cargado 22000, el 48% del Q descargado del cristal y la disipación del cristal 319 μW

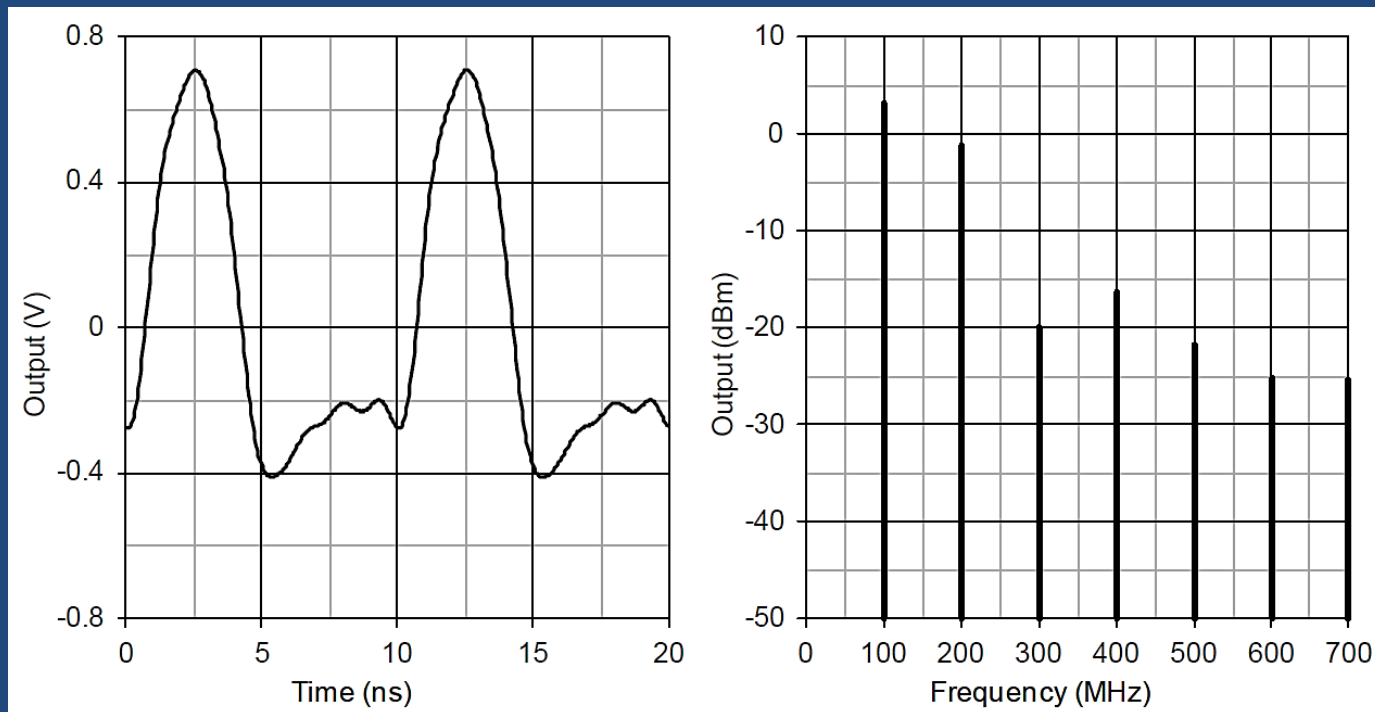


- Oscilador bipolar CC a cristal Butler en 5to sobretono
 - Es similar al Butler BC excepto que el tanque adapta la baja Z de salida de emisor a la alta de base



- Al igual que el Butler BC se debe poner una perla de ferrite o resistencia en la base para asegurar su estabilidad
- Igual que el Butler BC, la ganancia, la respuesta de fase y la adaptación son buenas con una $Z_o = 50 \text{ ohm}$
- El MG es aproximadamente 7 dB
- Se usa una fuente negativa, pero se puede usar una positiva con otra polarización o un PNP
- C_5 no es necesario cuando se cierre el lazo

- El Q cargado de 22000 es 48% del Q descargado del cristal
- La disipación es de 200 μW
- La forma de onda está severamente recortada en el pico negativo, lo que resulta en una mala performance armónica
- La forma de onda de salida mejora si se toma la salida de la unión de C_1 y C_2 , pero esto aumenta la disipación del cristal



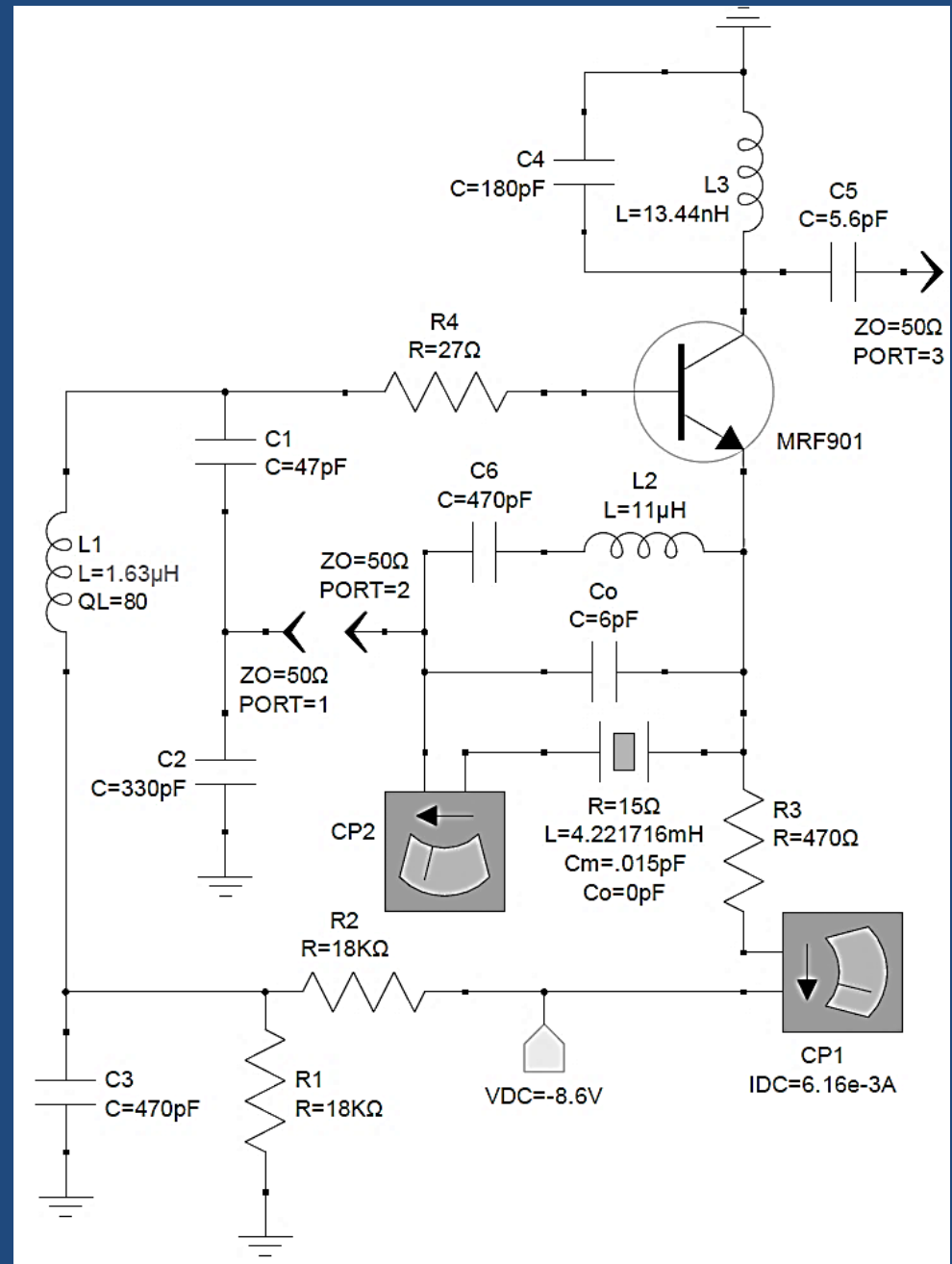
- Resumen de los ejemplos de osciladores a cristal
 - Los mayores desplazamientos respecto a la f serie del cristal se dan el Miller y Colpitts en fundamental
 - Esto es lógico ya que son osciladores catalogados como $||$ ya que funcionan entre la f de resonancia serie y la $||$
 - Los osciladores en sobretono Butler funcionan en la f de resonancia serie del cristal porque los L del tanque están ajustados para que esto suceda
 - El pushing se midió incrementando la V de alimentación de 8,6 a 9,6 V
 - Los diseños bipolares tienen un mejor pushing que los FET
 - El peor en este sentido es el Miller FET. Este tipo de oscilador no se recomienda en ningún caso

Tipo	Desp. (Hz)	Pushing (Hz/V)	Circuito (Hz)	Q cargado	Pot. Cristal (μ W)	η (%)
Miller FET	+2869	+61	Falla	2130	240	21,2
Colpitts Bip	+3282	0	-99	14200	775	2,4
Colpitts FET	+3597	+14	-111	42000	123	3,3
Pierce Bip	+209	0	+1	52100	175	2,3
Pierce MMIC	+249	0	-12	39100	866	1,2
Pierce Inversor CMOS	+1457	0	-69	54600	194	12,6
Mesa Pierce Bip	+7450	-56	-373	4250	531	1,9
Colpitts ST Bip	+3010	+30	-340	\sim 13000	326	2,8
Butler ST BC Bip	0	+66	Falla	22000	319	9.9
Butler ST CC Bip	0	-107	-3000	22000	200	3.0

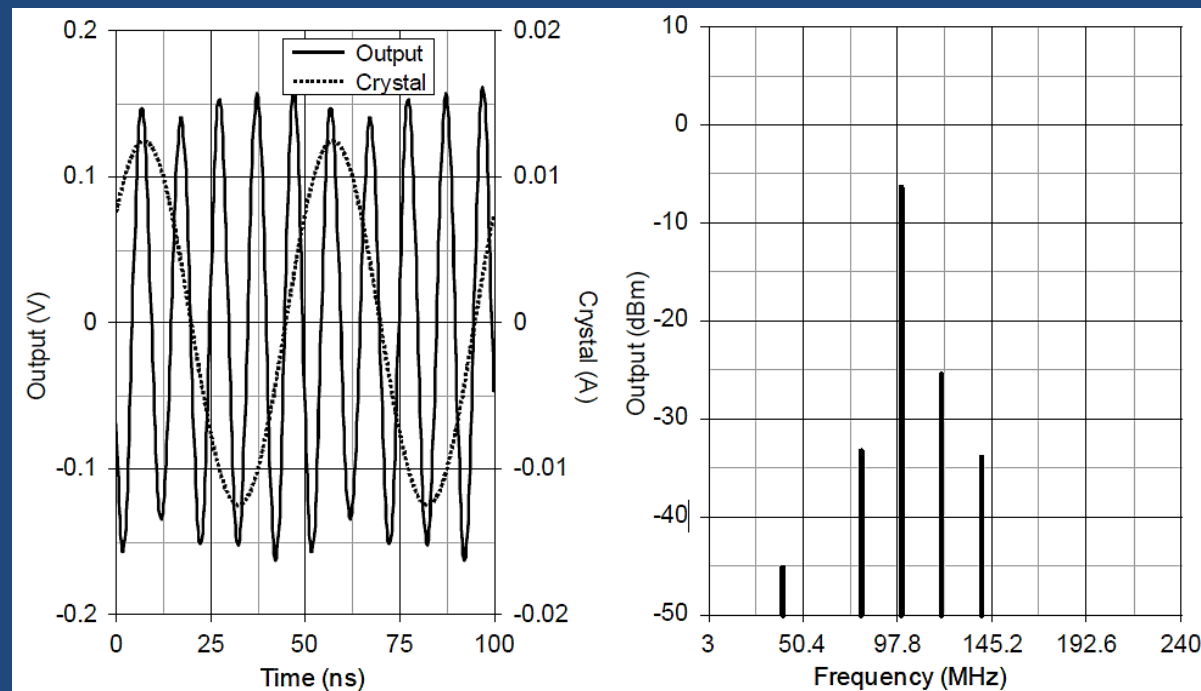
- La columna denominada Circuito (Hz) es el desplazamiento de frecuencia causados al aumentar en un 5% las reactancias de carga del cristal
- Este desplazamiento de frecuencia es un indicativo importante del comportamiento del oscilador con el envejecimiento y los cambios de temperatura
- Una variación de un 5% de las reactancias de carga puede llevar a que no oscile como sucede con oscilador Miller FET y el Butler BC en modo sobretono
- Una comparación más justa sería normalizando el desplazamiento con la frecuencia de operación. La frecuencias de funcionamiento en modo sobretono y del Pierce mesa invertida son 10 veces mayores
- Los osciladores Pierce son los que presenta mayor Q_L , que es muy importante para obtener un bajo ruido de fase
- La mayor disipación la tienen Colpitts bipolar en fundamental y el Pierce MMIC
- La tabla es solo una referencia y no se debe interpretar en forma literal
- Buenas elecciones son
 - Colpitts FET por la poca cantidad de componentes
 - Pierce bipolar y inversor CMOS por el rendimiento
 - Buttler bipolar CC para los osciladores en sobretono

Oscilador Butler con multiplicador de frecuencia X5 incorporado

- El cristal funciona en fundamental en 20 MHz
- La corriente de colector es casi impulsiva, rica en armónicos
- El resonador || del colector resuena en el 5to armónico a 100 MHz
- Es necesario un dispositivo con una alta f_T que tenga buena ganancia en el 5to armónico
- R_4 estabiliza y L_2 cancela C_0

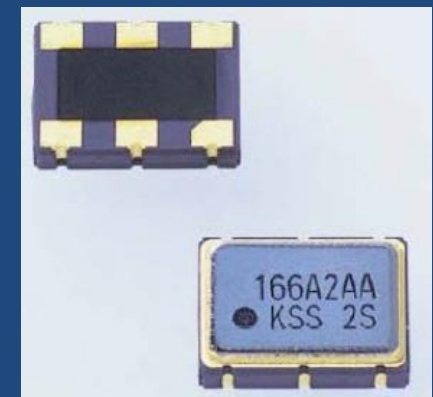
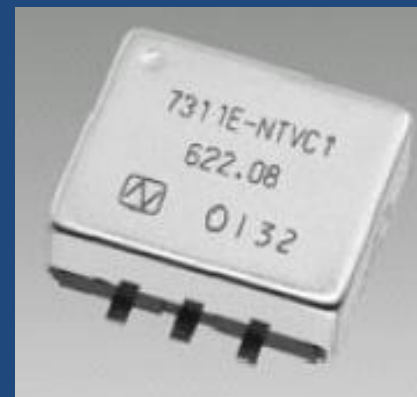


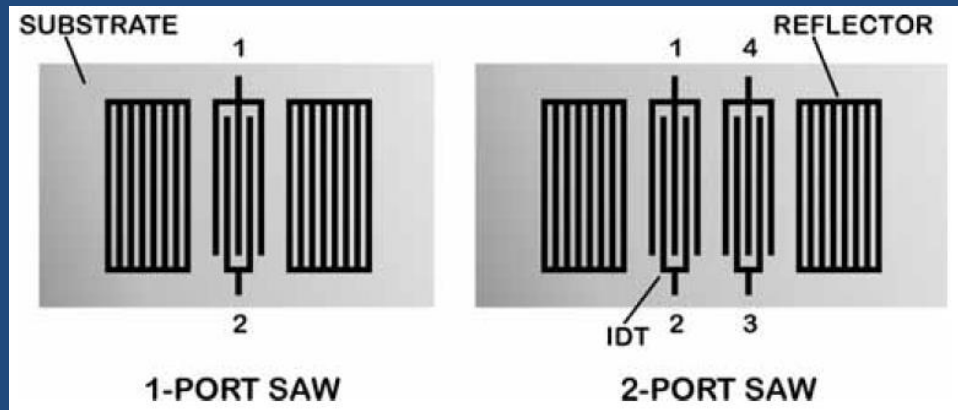
- En el lado izquierdo de la figura se muestra en línea de puntos la corriente en el cristal y la tensión de salida en línea continua
- A la derecha el espectro de la tensión de salida
- Este circuito oscilador facilita el pulling (ajuste o modulación) de la alta frecuencia de salida ya que se realiza en fundamental
- Una alternativa a esta solución es usar un cristal mesa invertida
- La potencia de salida es -6,4 dBm



- Arranque de los osciladores a cristal
 - Si el Q cargado es elevado comienza lentamente
 - Un Q de 100000 puede necesitar 1 s o más para llegar a régimen
 - Cuando se estabiliza la temperatura por horno la f de funcionamiento final se alcanza después de varios minutos (15 minutos o más)

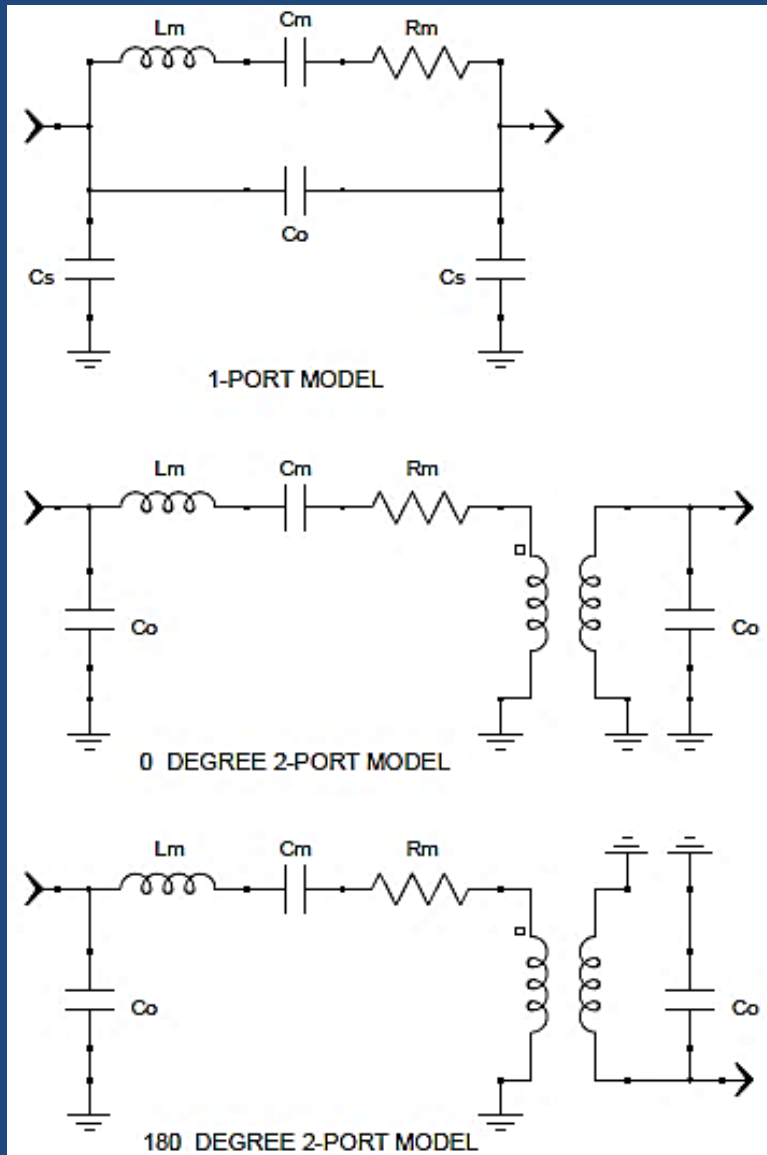
- Resonadores de onda acústica superficial
 - Utilizan una onda acústica que viaja sobre la superficie de un substrato elástico de material piezoeléctrico
 - cuarzo, niobato de litio, tantalita de litio , lantano silicato de galio y otros
 - El cuarzo se usa para resonadores de alto Q y filtros de banda angosta donde la estabilidad con la temperatura es importante
 - El niobato y la tantalita de litio se aplican en filtros de banda ancha por su elevado efecto piezoeléctrico atenuando en algo la elevada pérdida de inserción de estos filtros
 - La amplitud de la onda acústica decrece con la profundidad





- Existen de 1 o 2 puertos, en la figura se muestran geometrías básicas
- Para la deposición de las estructuras conductivas del transductor interdigital (IDT) se usan técnicas litográficas
- Cuando la f de la señal es igual al V_s/p , las ondas generadas por cada dedo están en fase. Esto implica resonancia
- Los reflectores confinan la energía en el substrato
- La f practica inferior está limitada por el tamaño máximo del substrato y la superior por la resolución mínima en la trama IDT
- Los resonadores SAW se aplican de 10 a 2500 MHz pero son más comunes entre 300 y 1000 MHz
- La estabilidad y el Q descargado es menor que los BAW pero mayor que los resonadores $L-C$
- La f de resonancia es mayor que la de los BAW
- Disipan mayor potencia que los BAW pudiendo llegar a 10 dBm

- Modelos de resonadores SAW

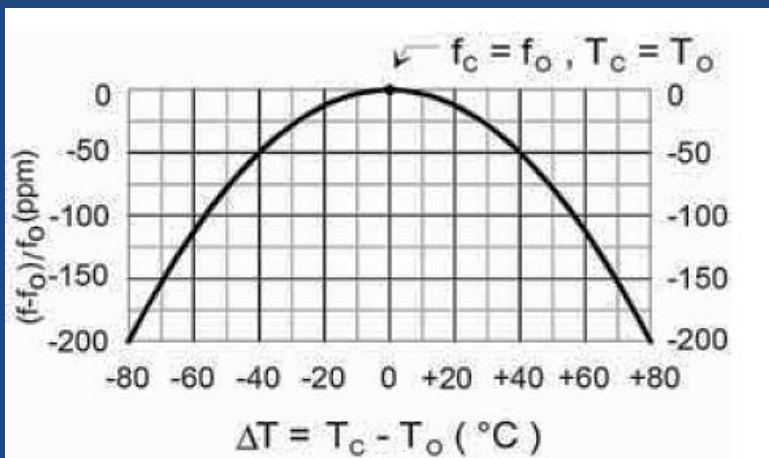


- El modelo de 1 puerto es similar al resonador BAW con el agregado de la capacidades C_s que representan la capacidad parásita tierra de los IDT y terminales de conexión
- Al medio un modelo de 2 puertos con 0° de desfase
- El que sigue es un modelo de 2 puertos con 180° de desfase
- En la tabla que sigue se dan valores típicos para resonadores SAW de Monolithics

- Los valores de la resistencia movicional son significativamente menores en los resonadores de 1 puerto
- Pero la L_m es también mucho menor por lo que los Q sin carga son similares
- El Q descargado tiende a disminuir con el aumento de la frecuencia
- Estos resonadores tienen una Q descargado de 12000 a 300 MHz cayendo a 6000 a 1000 MHz
- La excepción es el resonador RO2071-2 que tiene un Q descargado de 18000 a 980 MHz.

Modelo	Desfasaje	f (MHz)	Rm (ohm)	Lm (μ H)	Cm (fF)	C0 (pF)	Cs (pF)
Un puerto							
RO2073	0°	315,00	19	127,667	1,99943	2,6	0,5
RO2101	0°	433,92	18	86,0075	1,56417	2,0	0,5
RO3164	0°	868,35	11	11,0	3	1,9	0,5
RO2071-2	0°	980,00	12	35,0	0,76	2,5	0,5
Dos Puertos							
RP1239	180°	315,00	84	758,027	0,336771	2,2	
RP1308	180°	433,92	107	481,378	0,279470	1,7	
RP1104	180°	824,25	182	248,091	0,150284	1,5	
RP1094	180°	915,00	166	191,3434	0,158119	1,4	

- Estabilidad en f de los SAW
 - Son un orden de magnitud peor que los resonadores de cuarzo BAW
 - La exactitud y el Q descargado son 2 órdenes de magnitud mejores que los L - C
 - La exactitud inicial de un resonador SAW de bajo costo puede ser típicamente ± 200 ppm
 - Se puede usar una reactancia para ajustar la f inicial
 - La tasa típica de envejecimientos es < 10 ppm/año
 - La curva de variación de f con respecto a una T_0 depende del corte y del diseño, normalmente $T_0 = 25^\circ\text{C}$



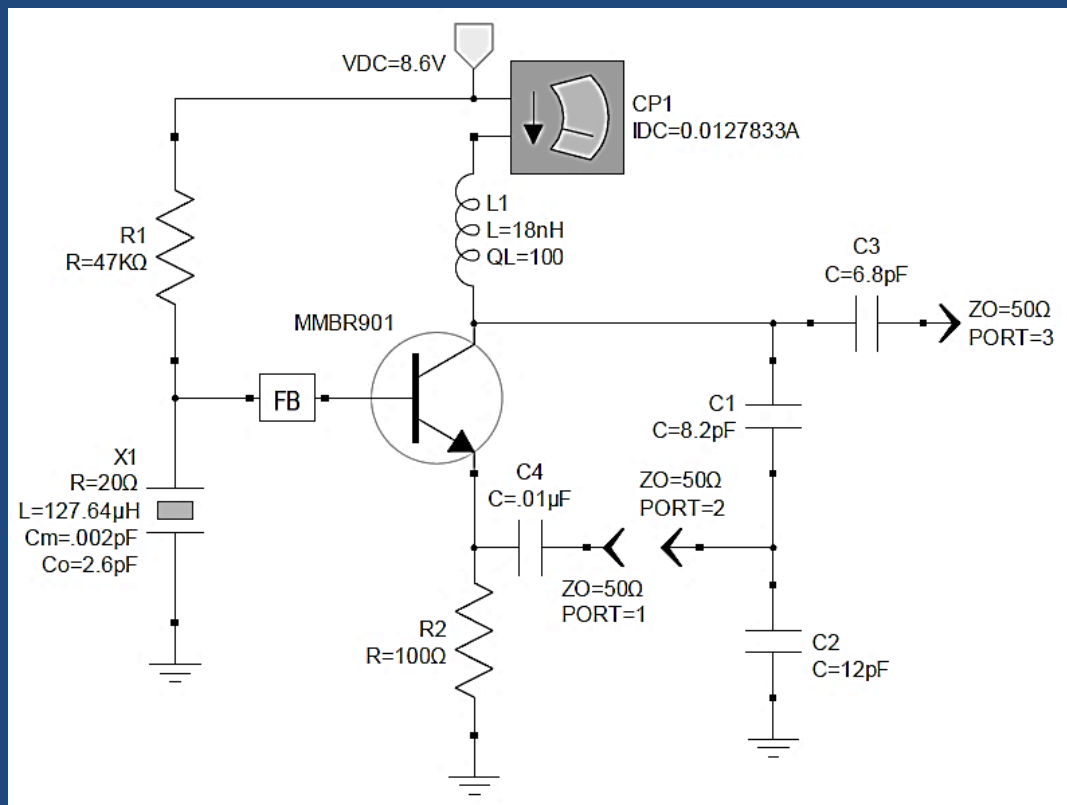
- La variación de la f de resonancia con la temperatura de la cápsula T_c está dada por
 - $f = f_0[1 - FTC(T_0 - T_c)^2]$
- $FTC = 0,037$ para los resonadores de la tabla
- Además T_0 tiene una tolerancia de $\pm 10^\circ\text{C}$

- Osciladores SAW

- Se analizan algunos ejemplos que tienen en común lo siguiente

- Tensión de alimentación 8,5 V
 - Terminaciones elegidas de lazo abierto 50 ohm
 - Si hay pobre adaptación se usa Randall/Hock
 - Se usan dispositivos Monolithics de 315 MHz
 - De 1 puerto: $R_m = 20 \text{ ohm}$, $C_m = 2 \text{ fF}$, $C_0 = 2,6 \text{ pF}$ y $Q_U = 12600$
 - De 2 puertos: $R_m = 84 \text{ ohm}$, $C_m = 0,34 \text{ fF}$, $C_0 = 2,2 \text{ pF}$ y $Q_U = 17700$
 - La f de resonancia || está 121 kHz encima de la serie
 - En los BAW es común usar una L para cancelar C_0 pero es poco común en los SAW por lo que no se usa en los ejemplos
 - Se usa como elemento activo un transistor MRF901. En la simulación se usa un modelo SPICE de Motorola

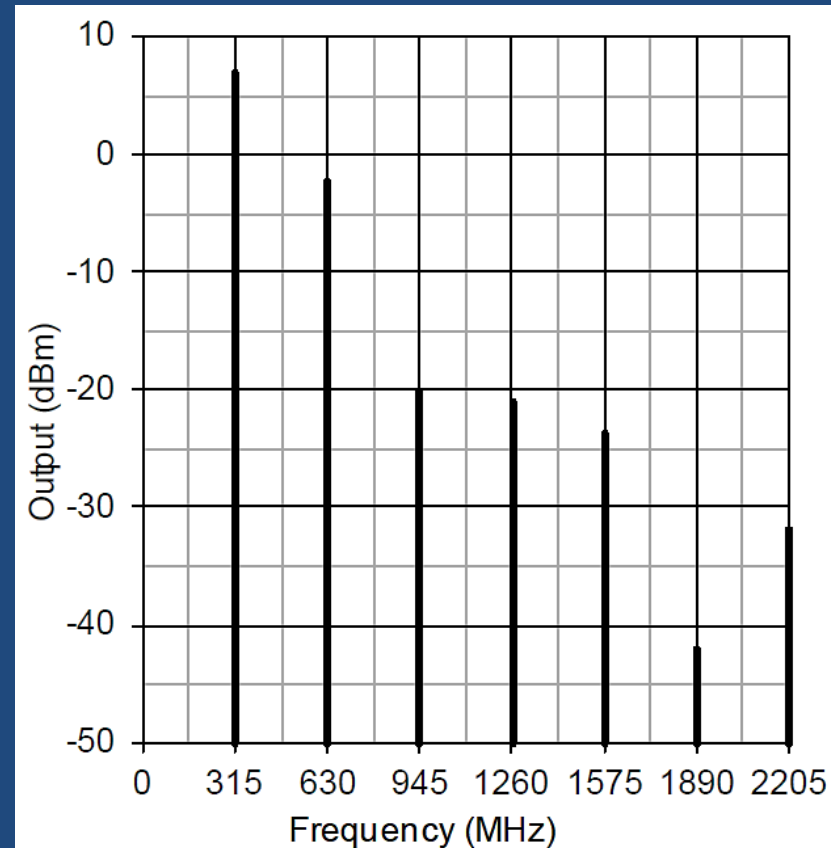
• Oscilador Colpitts bipolar SAW de 1 puerto



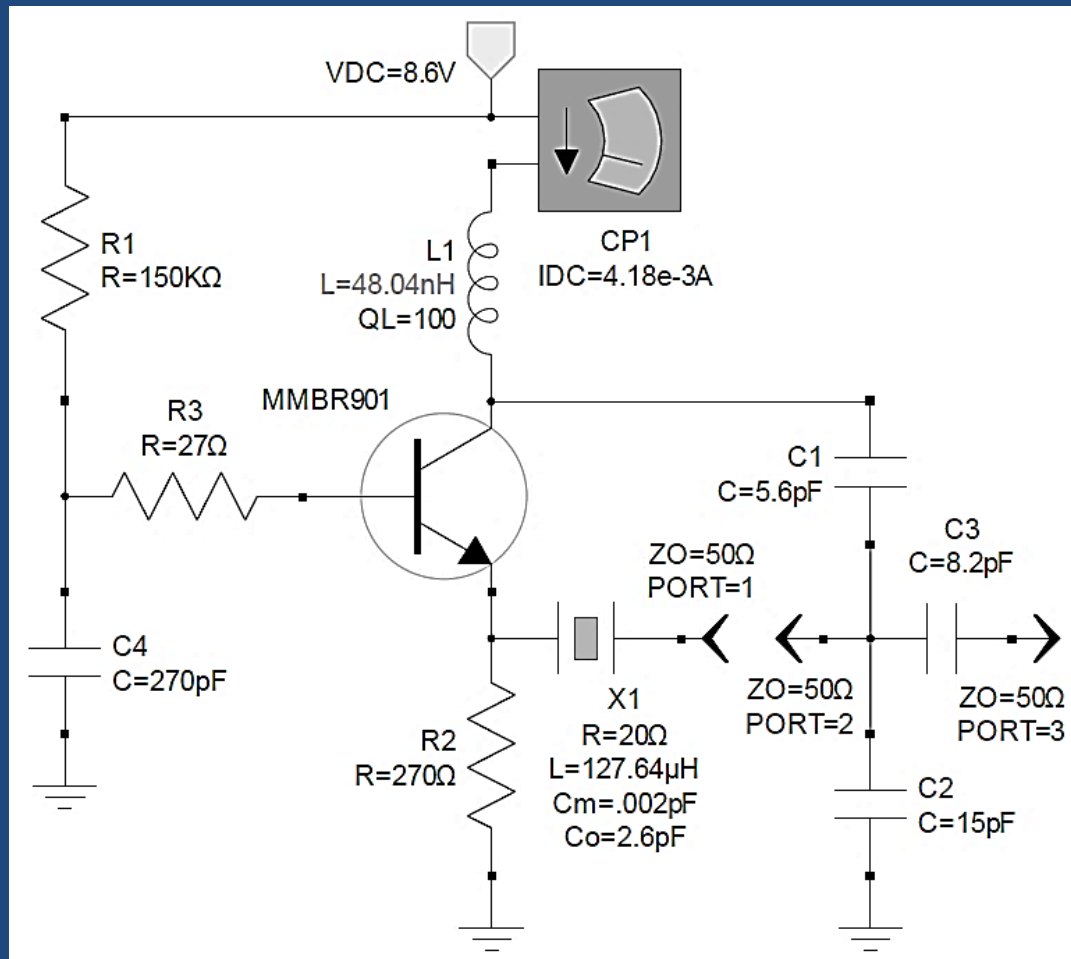
- C_1 serie con C_2 resuenan con L_1
- La derivación entre C_1 y C_2 adapta la alta Z de salida con la baja de entrada
- Para resonancia el SAW pone la base a tierra a través de su R_m
- Una perla de ferrite estabiliza el transistor
- El fabricante del SAW ha publicado este circuito que se ha hecho popular para abre puertas inalámbricos

- El Q cargado de este circuito es aproximadamente 6000 pero depende mucho de la sintonía del tanque de colector
- La potencia se extrae por el capacitor de acoplamiento C_3
- Se podría conectar una antena en este nodo o L_1 podría ser un lazo de antena
- La potencia también se puede extraer del nodo C_1 - C_2

- La potencia de salida es aproximadamente 7 dBm
- Debido a que la energía se extrae del circuito resonante la performance armónica es buena
- La disipación del SAW es de $930\text{ }\mu\text{W}$

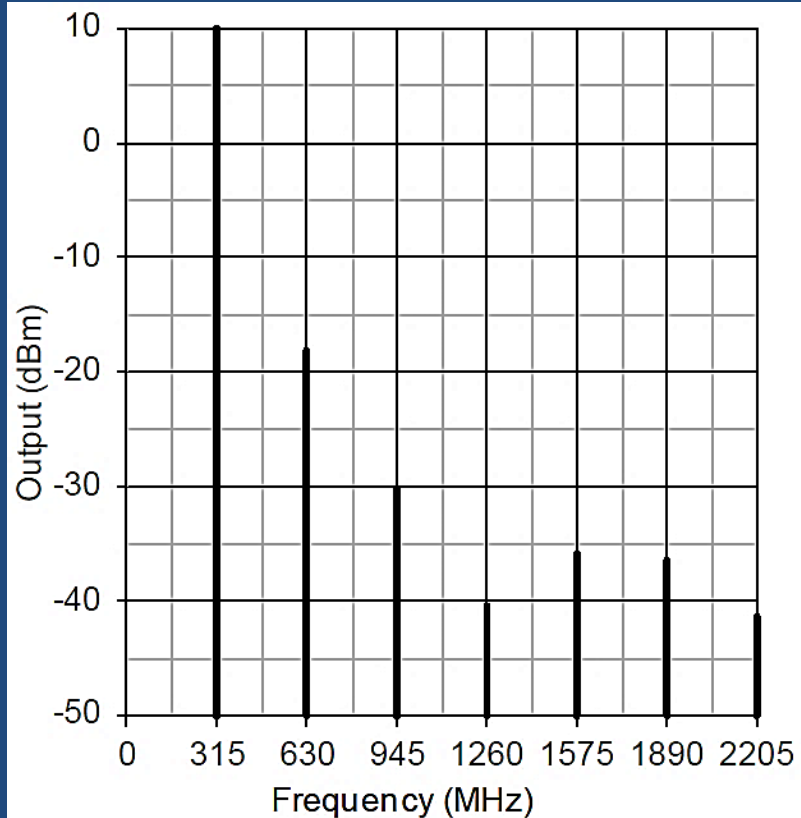


- Oscilador bipolar Butler con SAW de 1 puerto



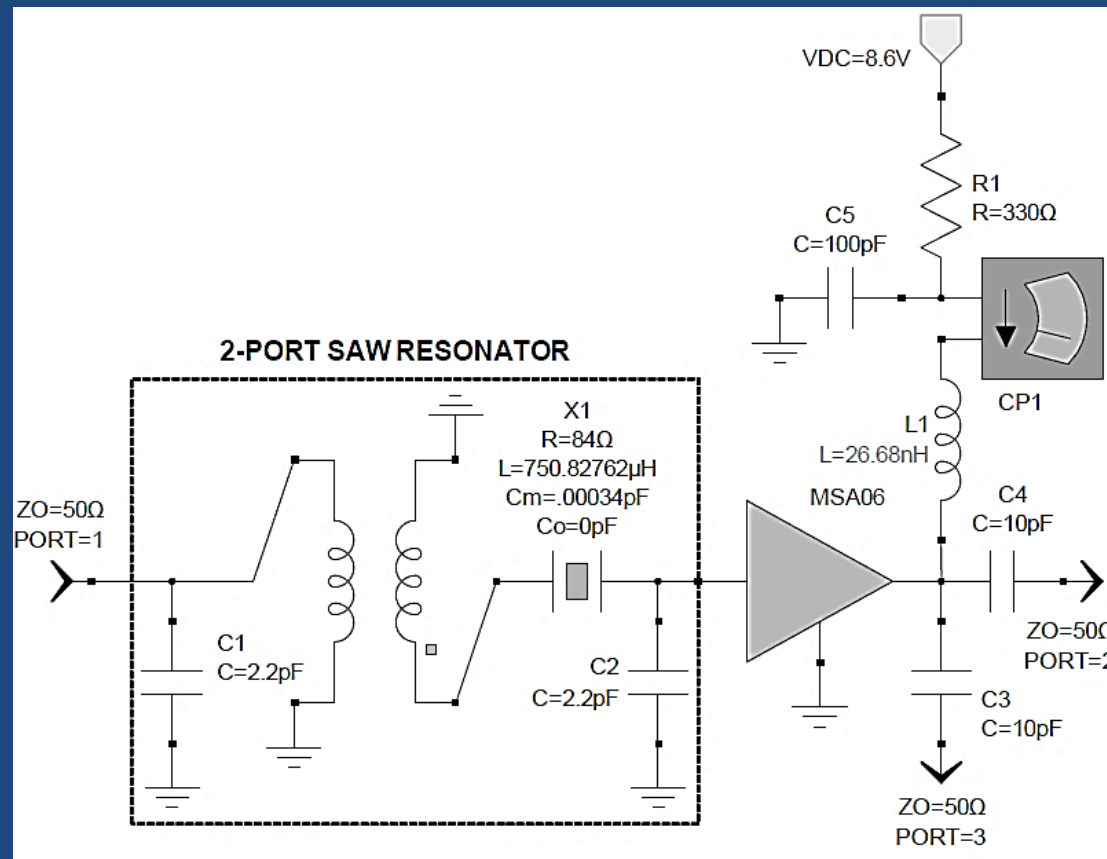
- El circuito es similar al anterior salvo por la posición del resonador
- En el análisis harmónico balance, L_1 se optimizó para máxima potencia de salida
- R_3 estabiliza el circuito
- La potencia de salida es de 10,4 dBm y la disipación del SAW es de 1,33 mW

- El Q cargado del tanque es mejor que en el ejemplo anterior, por lo que la performance armónica es excelente
- El 2do armónico está casi en -30 dBc
- Sin embargo el Q cargado de la cascada solo vale 2460, 19% del Q descargado del resonador SAW



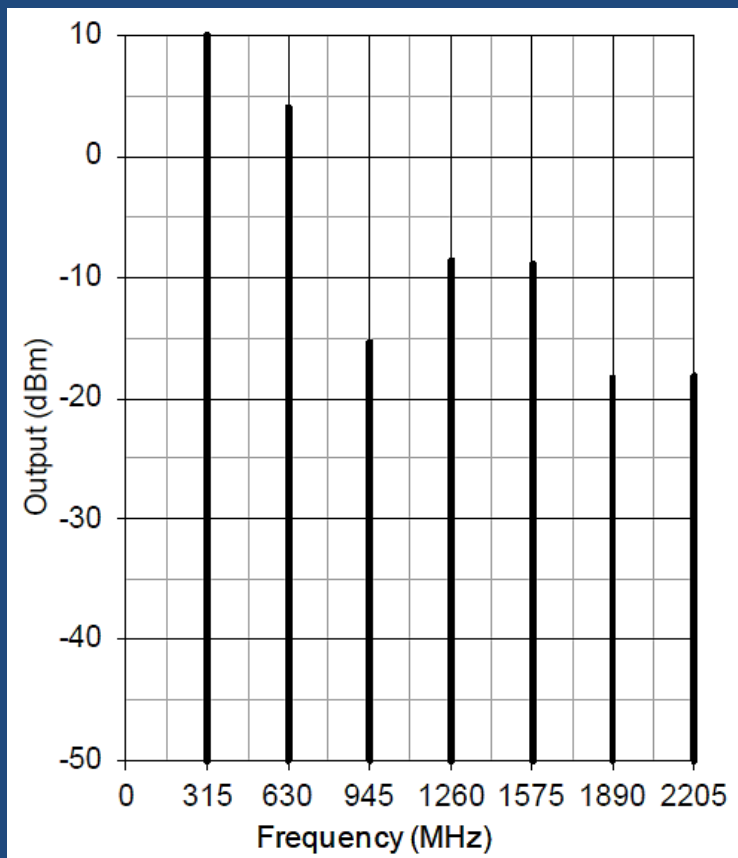
- Con una R_m de 20 ohm solo se podría lograr un buen Q cargado si las impedancias presentadas al SAW por la resistencia de emisor y la derivación capacitiva fueran muy bajas

- Oscilador Pierce con SAW de 2 puertos y amplificador MMIC
 - C_4 no es solo un C de bloqueo, tiene una reactancia de 50 ohm a 315 MHz
 - C_4 con L_1 hacen un filtro pasa alto que provoca un adelanto de fase necesario para ajustar la máxima pendiente en el paso por 0°



- El MMIC es un MSA06 de Avago o un MAR6 de Mini-Circuits realimentado resistivamente, compuesto de un par de Darlington en configuración EC
- El valor de R_1 especificado por el fabricante establece la corriente de polarización en 16 mA

- El $MG \approx 10$ dB es algo elevado
- Se podría aumentar C_1 y C_2 lo que aumentaría el Q y reduciría la ganancia
- El Q cargado sin agregar capacidades vale 8540, 48% del Q descargado del SAW



- El elevado Q_L y la potencia de salida de 10 dBm ofrecen la mejor performance de ruido de fase de los 3 circuitos de ejemplo
- La disipación del SAW es de 2 mW
- El desempeño armónico es pobre, de solo -6 dBc

- Resonadores cerámicos piezoeléctricos
 - Los resonadores que usan cerámicas piezoeléctricas son una opción intermedia entre los relativamente caros resonadores de cuarzo BAW y los económicos resonadores L - C que poseen poca estabilidad y bajo Q cargado
 - El material más común es el titanato circonio de estaño
 - Se usan en la gama de 0,4 a 60 MHz, superando en fundamental a la f de los cristales BAW
 - Inicialmente se usaron en Rx como filtros de FI en 455 kHz y 10,7 MHz y en discriminadores de FM
 - Por su bajo precio y resistencia a golpes y vibraciones reemplazan a los BAW de cuarzo en aplicaciones no críticas
 - Se pueden diseñar para que suprima la resonancia en modo fundamental haciendo innecesario el uso de un circuito tanque que desaliente las oscilaciones en ese modo
 - Los fabricantes de resonadores cerámicos publicitan que tienen un arranque muy rápido, pero eso es solo consecuencia de un menor Q cargado que los resonadores de cristal de cuarzo

- Transmisor para discapacitados auditivos
- Oscilador Colppits CTXO 3er armónico 72 MHz

