

DESARROLLO DE OSCILADORES DE ZAFIRO DE BANDA C DE ULTRA BAJO RUIDO DE FASE

Nicolás A. Shtin, José Mauricio López Romero
División de Tiempo y Frecuencia, CENAM, Queretaro, Qro. 76246, México

NOTAS QUE DEBEN AGREGARSE A LAS PRESENTACIONES DEL PERSONAL DEL CENAM

NOTA 1. Este trabajo ha sido desarrollado con recursos del gobierno federal de México. Sólo se permite su reproducción sin fines de lucro y haciendo referencia a la fuente.

NOTA 2. En este documento pueden aparecer marcas comerciales únicamente con fines didácticos y a fin de lograr un entendimiento claro de las técnicas y procesos descritos. En ningún caso esta identificación implica recomendación o aval del CENAM o de alguna otra institución del gobierno federal de México, ni tampoco implica que los equipos o materiales identificados sean necesariamente los mejores para el propósito para el que son usados. El CENAM y las demás instituciones no tienen compromisos con ninguna marca comercial en particular.



**Encuentro Nacional de
Metrología Eléctrica 2009**
18-20 de noviembre

→ Electromagnetismo
→ Temperatura y
Propiedades Termofísicas
→ Tiempo y Frecuencia



Contenido

1. Resumen

2. Antecedentes

3. Resonadores de Zafiro de onda viajera

4. Osciladores de Zafiro con estabilización combinada de frecuencia

5. Trabajo para el futuro

Resumen

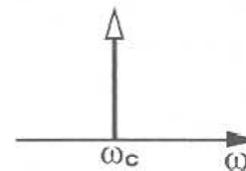
En el presente trabajo se reporta el diseño, caracterización y análisis del ruido de osciladores de microondas de muy bajo ruido de fase basados en resonadores de cristal de zafiro. El desarrollo de dichos osciladores es realizado en el CENAM con el objetivo de contar con generadores de microondas de muy alta estabilidad de frecuencia a corto plazo para ser utilizados como osciladores locales en patrones primarios de frecuencia y en algunos otros proyectos como el patrón de tensión eléctrica basado en el efecto de Josephson, en el patrón de frecuencia de banda óptica (peine de frecuencias) y para la realización de mediciones del “jitter” en los sistemas de telecomunicaciones. Para lograr este objetivo se han diseñado, construido y caracterizado osciladores de zafiro para la frecuencia de 4.6 GHz basados en la técnica de estabilización combinada de frecuencia.

Antecedentes

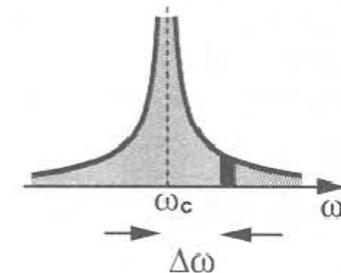
El ruido de fase de la señal en la salida de un oscilador se representa como la superposición del ruido de fase de amplificador y del ruido de frecuencia. El ruido total esta dado por la ecuación de Leeson:

$$S_{\phi}^{osc}(f_m) = S_{\phi}^{amp}(f_m) \left(1 + \left(\frac{f_{res}}{2Q_{eff} f_m} \right)^2 \right)$$

Ideal Oscillator

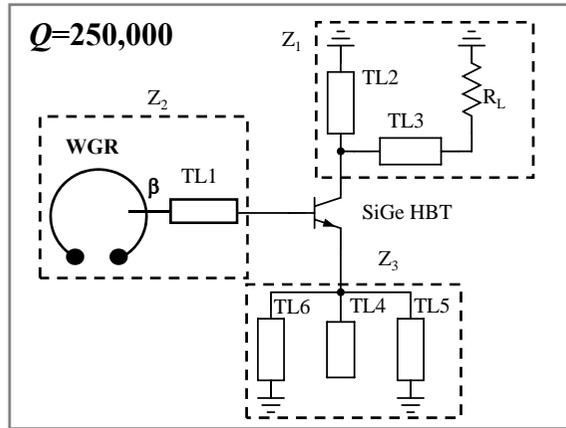


Actual Oscillator

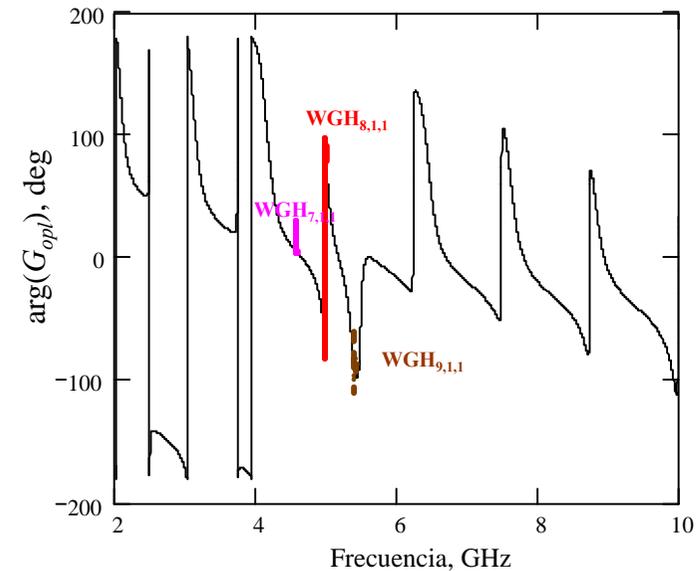
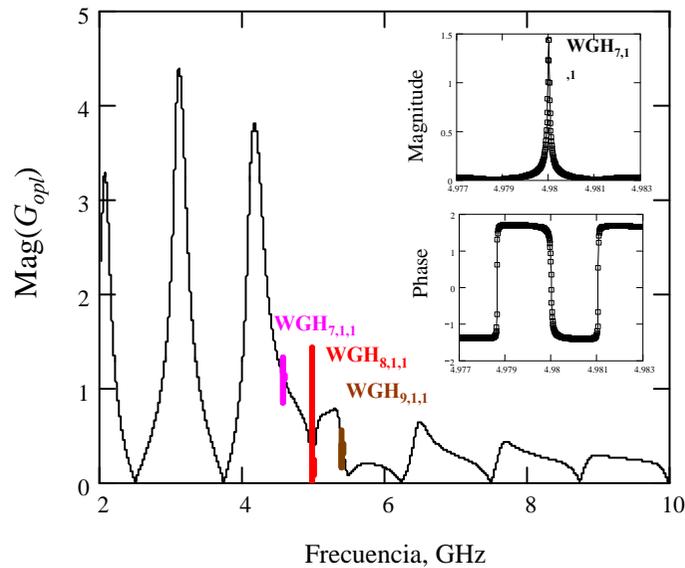


En esta ecuación los ruidos se definen en el dominio de frecuencia y se representan con sus densidades espectrales $S_{\phi}^{amp}(f_m)$ and $S_{\phi}^{osc}(f_m)$, donde f_m es la frecuencia de Fourier, la cual se define como el corrimiento de frecuencia al respecto a la frecuencia fundamental de oscilación.

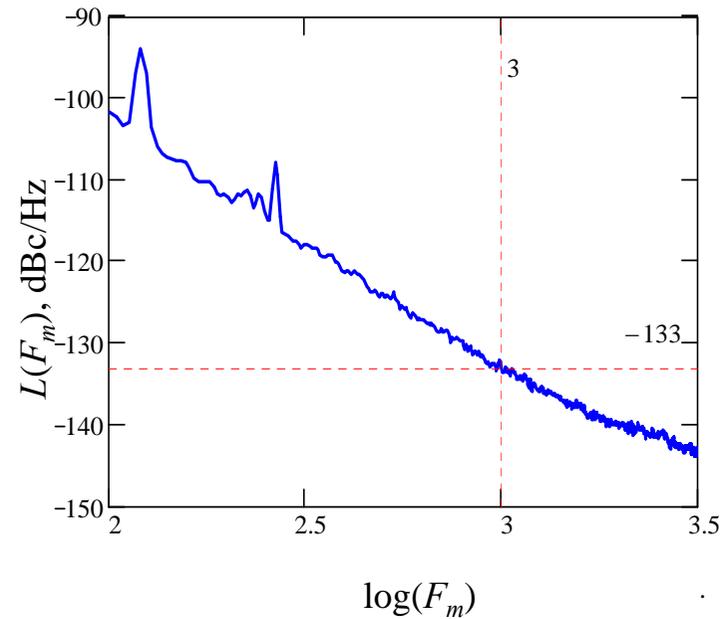
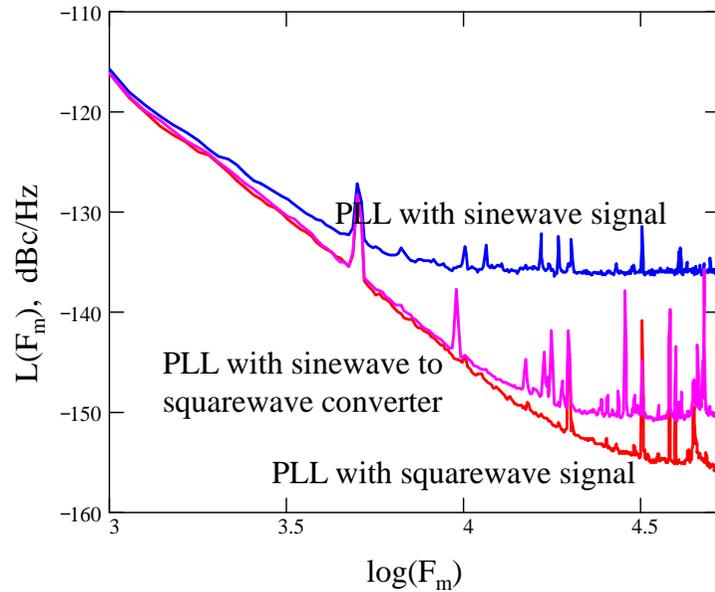
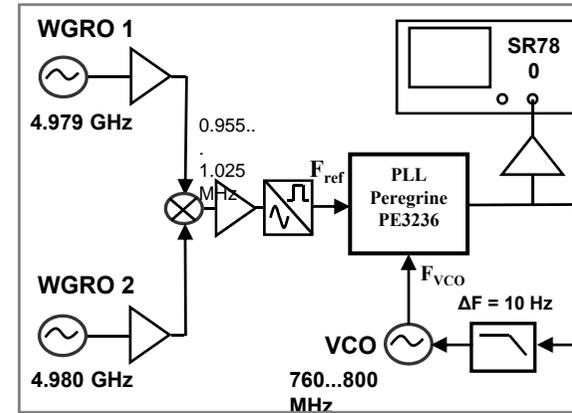
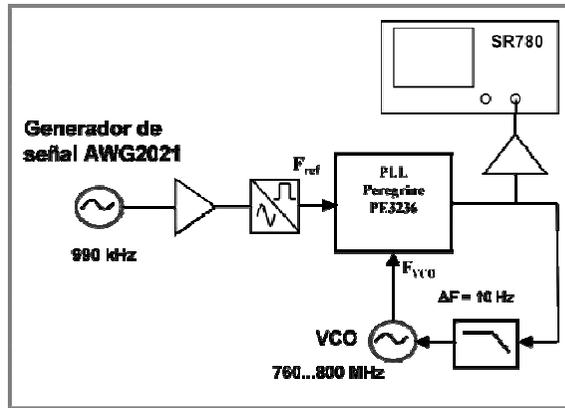
Antecedentes



N. A. Shtin, J. M. Lopez Romero and E. Prokhorov, "Design and Performance of Ultra Low Phase Noise Reflection Whispering Gallery Resonator Oscillator," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 49, No 8, pp. 2026-2030, 2007.

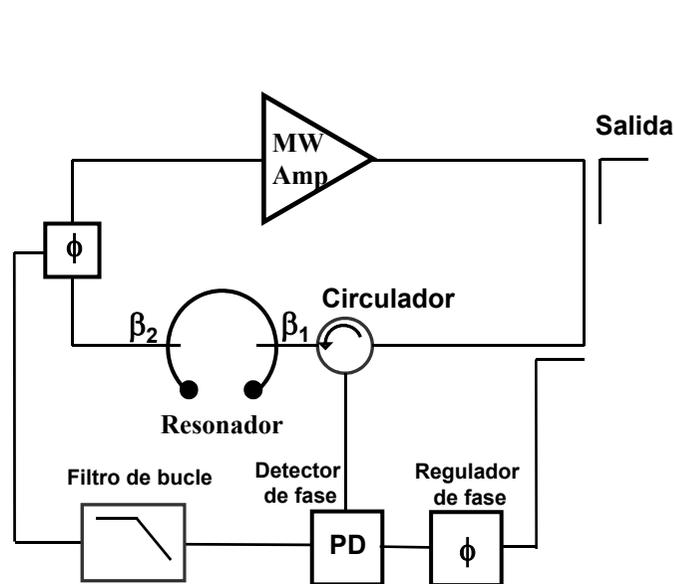


Antecedentes

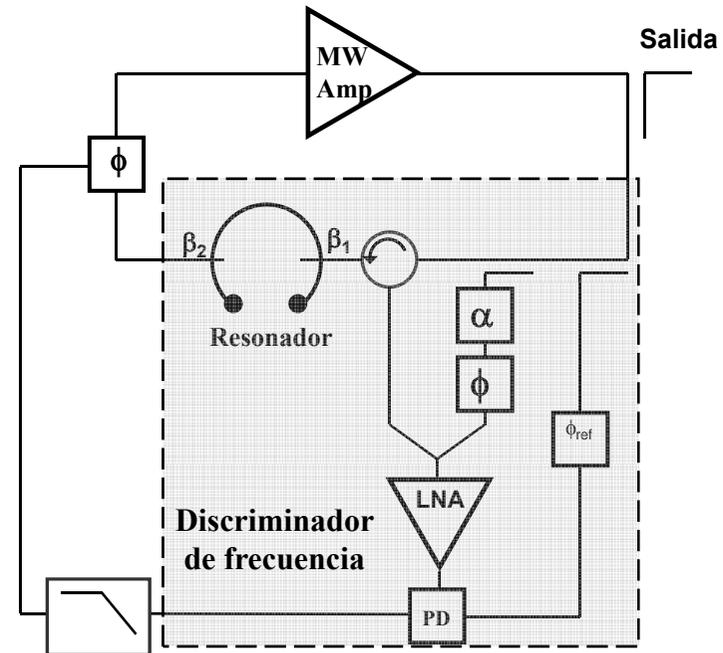


Antecedentes

Configuraciones de osciladores con estabilización combinada de frecuencia (Ivanov et. al. UWA)

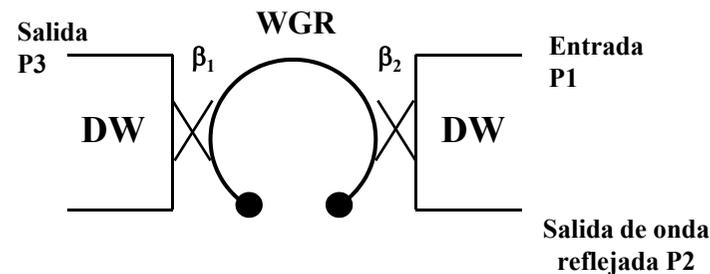
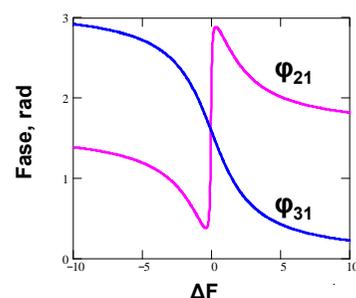
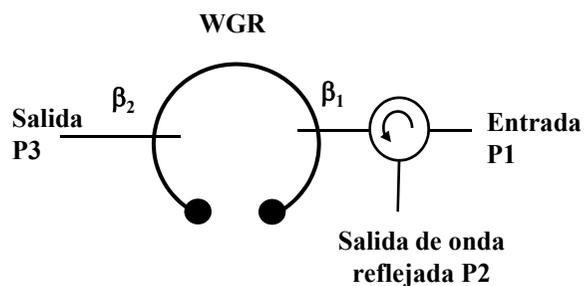
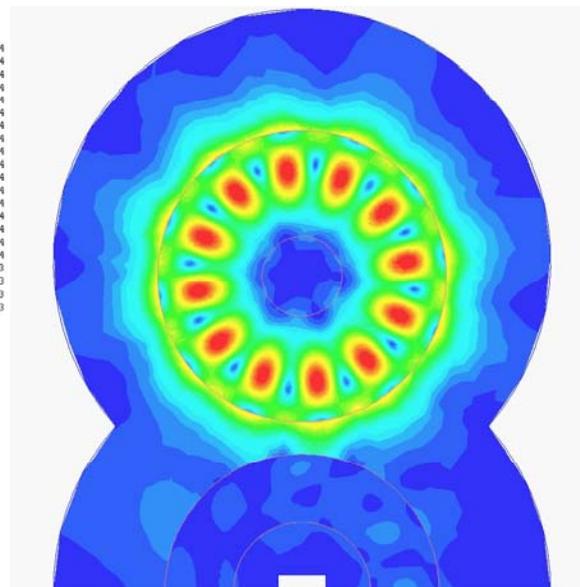
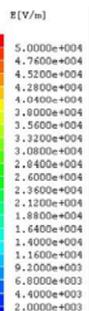
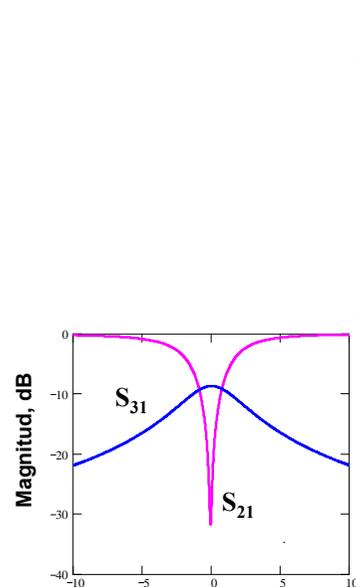
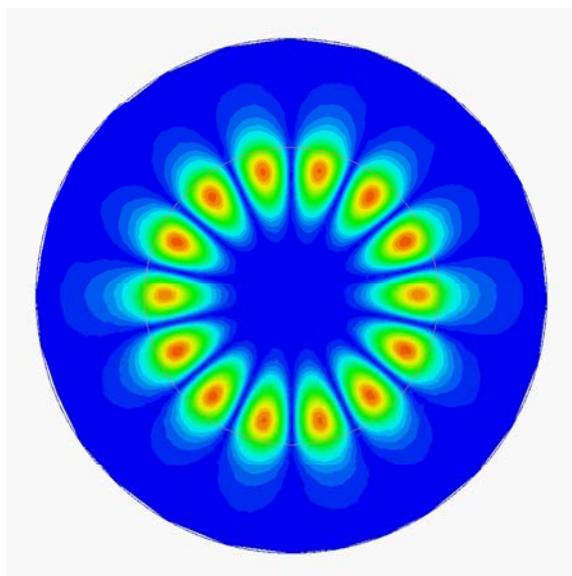


$L(1\text{kHz}) = -124 \text{ dBc/Hz}$, banda X



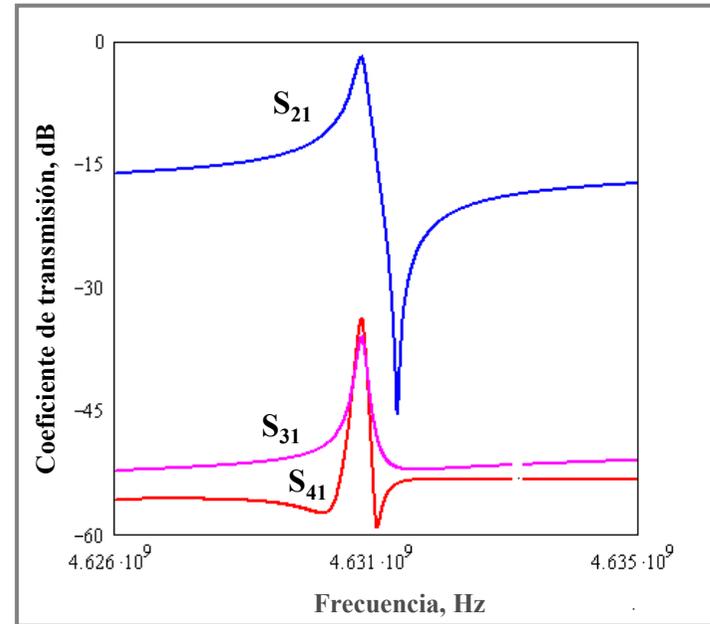
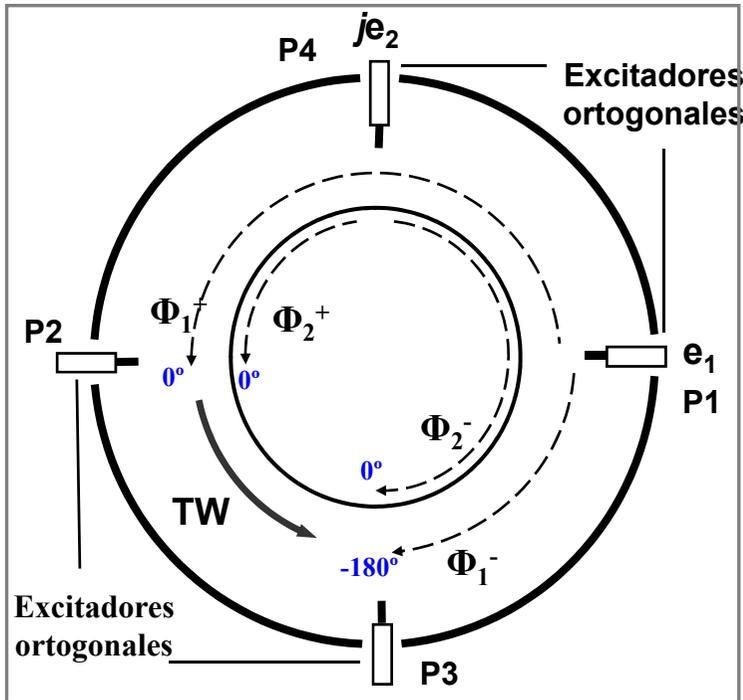
$L(1\text{kHz}) = -150...160 \text{ dBc/Hz}$, banda X

Resonador de Zafiro de Onda Viajera



D. P. Tsarapkin, N. A. Shtin, "Whispering gallery traveling wave interferometer for low phase noise applications," Proc. 2004 IEEE IFCS pp. 762-765.

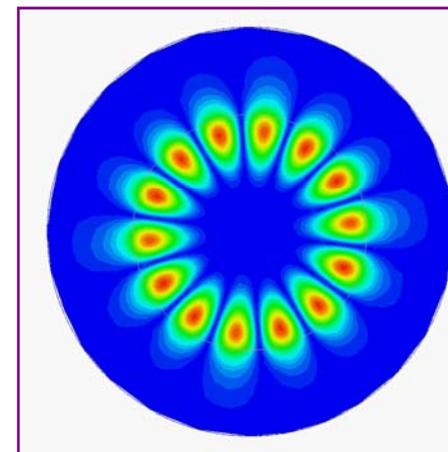
Resonador de Zafiro de Onda Viajera



$$\Phi(t, \varphi) = \text{Re} \left(\Phi_{01}^+ e^{j(v\varphi - \omega t)} + j\Phi_{02}^+ e^{j(v(\varphi - \pi/2) - \omega t)} \right) + \text{Re} \left(\Phi_{01}^- e^{j(-v\varphi - \omega t)} + j\Phi_{02}^- e^{j(-v(\varphi - \pi/2) - \omega t)} \right)$$

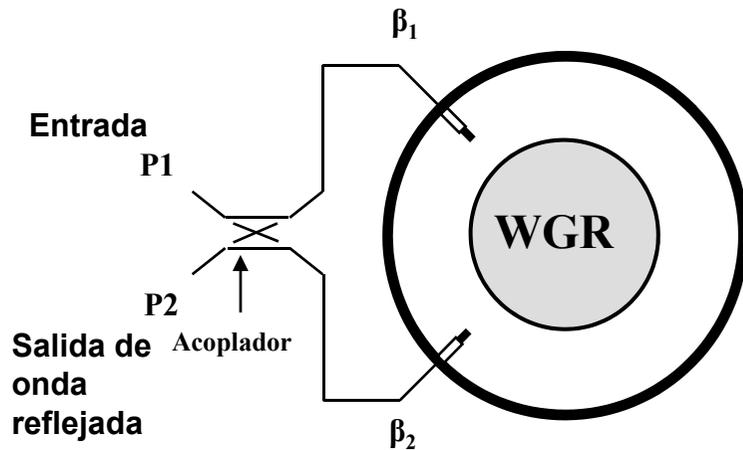
$$\Phi_{01} = \Phi_{02} = \Phi_0 \quad \Phi(t, \varphi) = \text{Re} \left(2\Phi_0^+ e^{j(v\varphi - \omega t)} \right)$$

N. Shtin, J. M. Lopez Romero and E. Prokhorov, "Novel Sapphire Directional Filters for Application to Ultra Low Phase Noise Oscillators," in proc. ICEEE-CIE 2006, pp. 403-407.

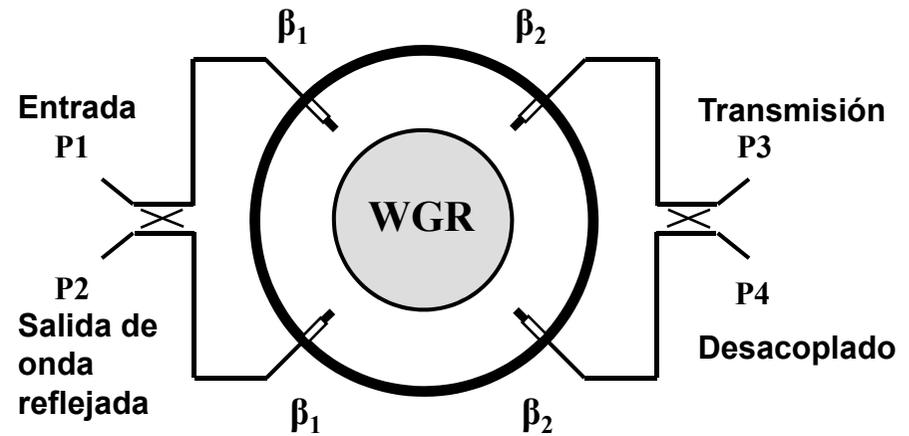


Resonador de Zafiro de Onda Viajera

Filtro direccional de 2 puertas

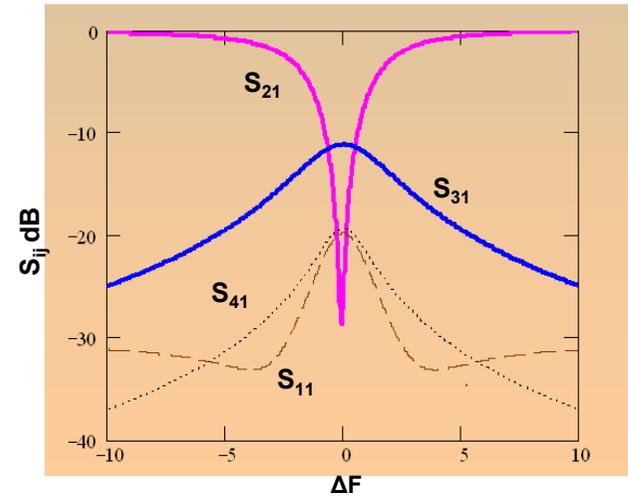


Filtro direccional de 4 puertas

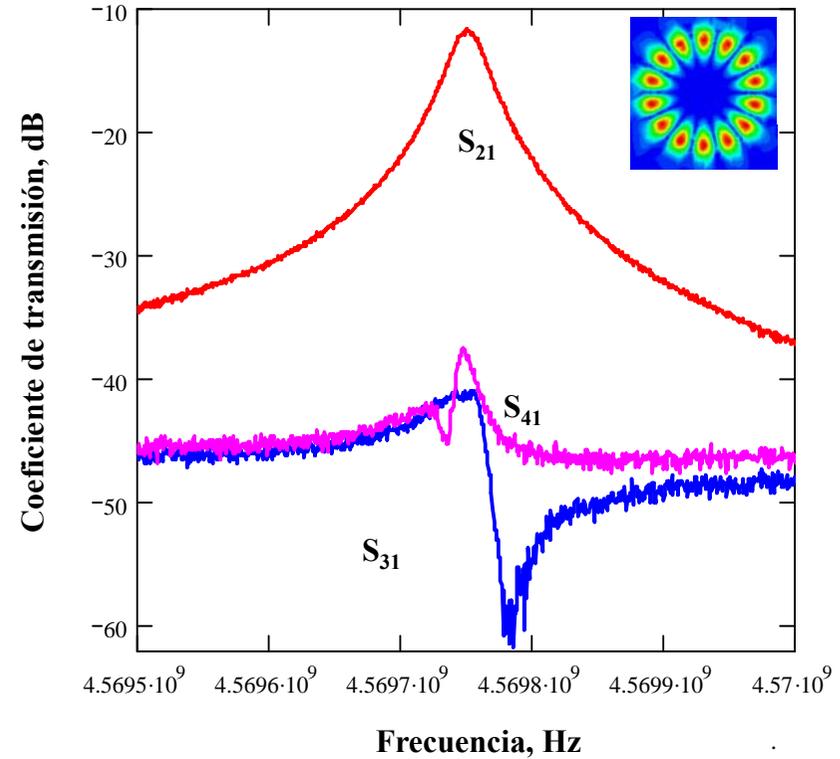
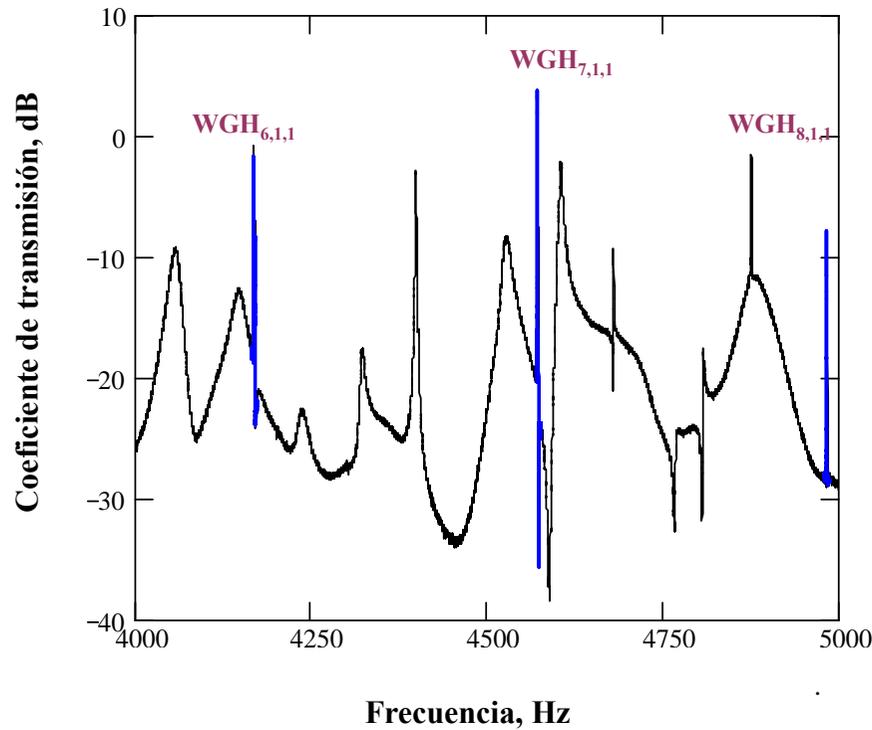


$$S_{11}^{DF} = \delta e^{j\pi/2}$$

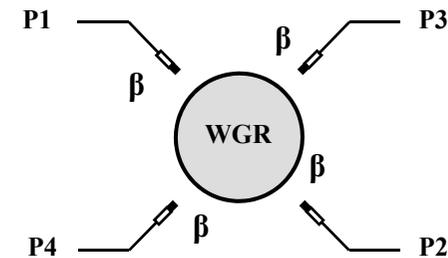
$$S_{21}^{DF} = S_{11}^{WGR} e^{j\pi/2}$$



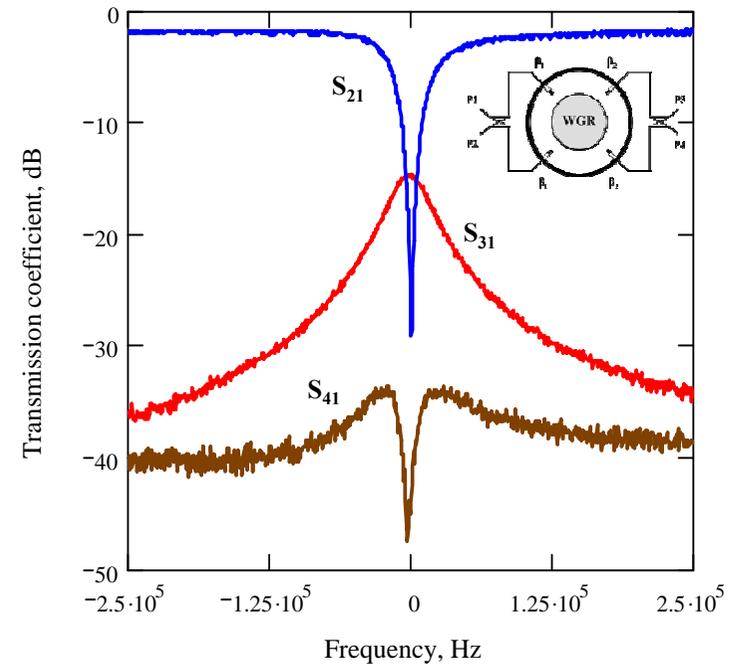
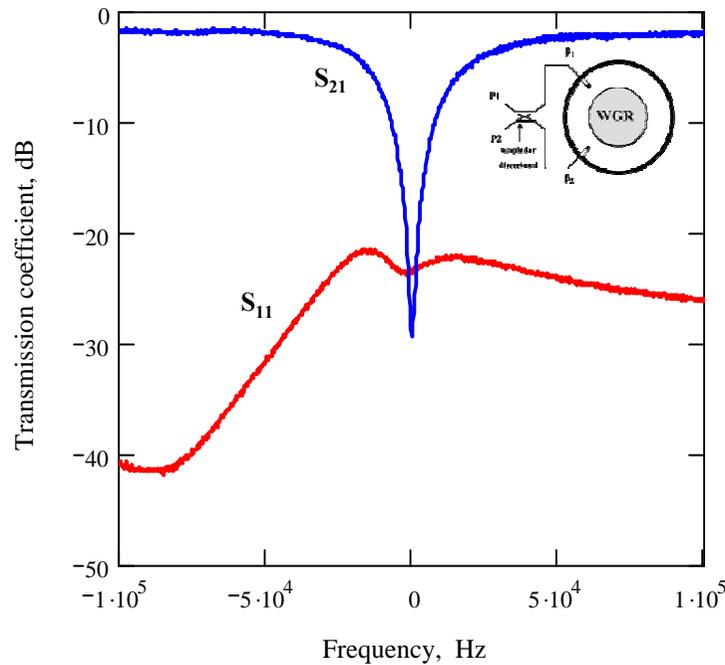
Resonador de Zafiro de Onda Viajera



WGH_{7,1,1} $F_{res} = 4.5697 \text{ GHz}$
 $Q_0 = 350,000$

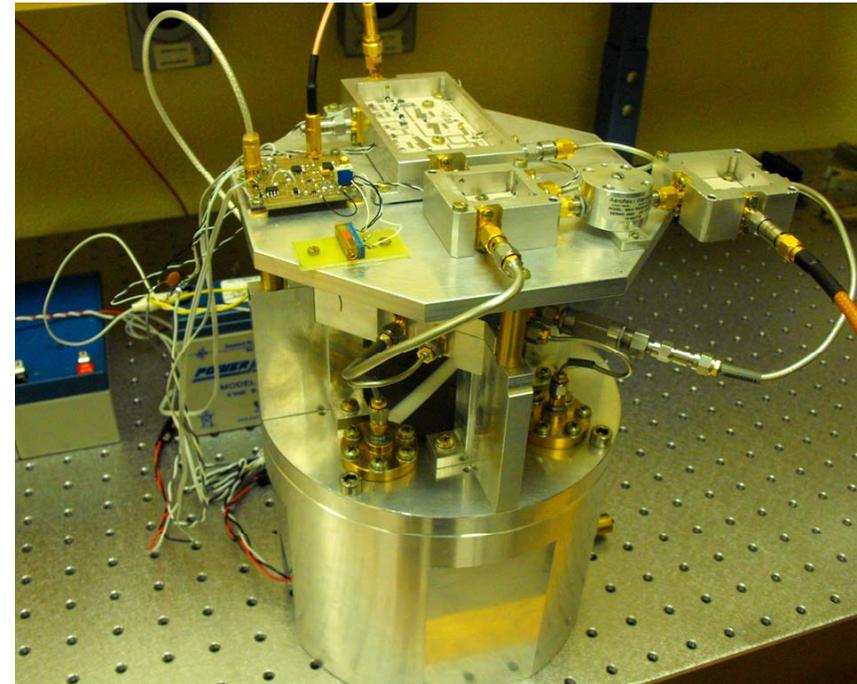
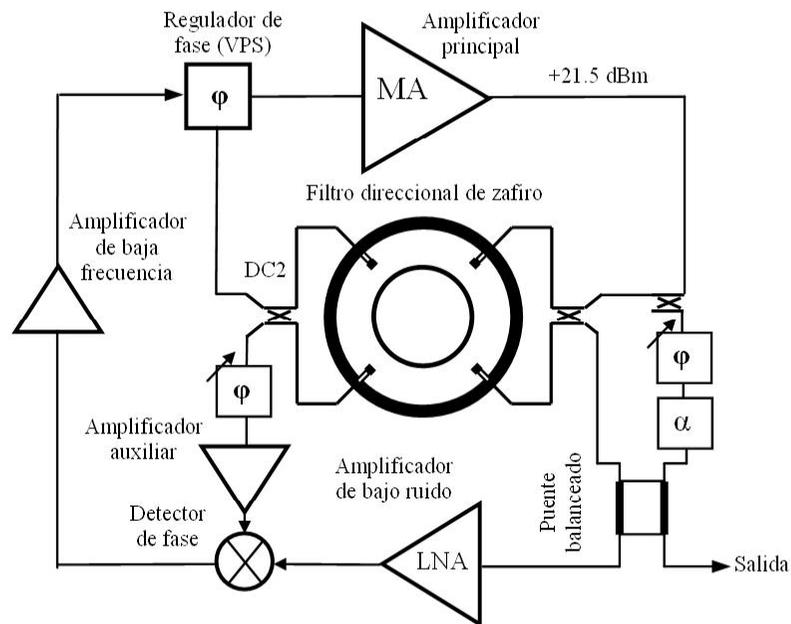


Resonador de Zafiro de Onda Viajera



Oscilador de Zafiro de Onda Viajera

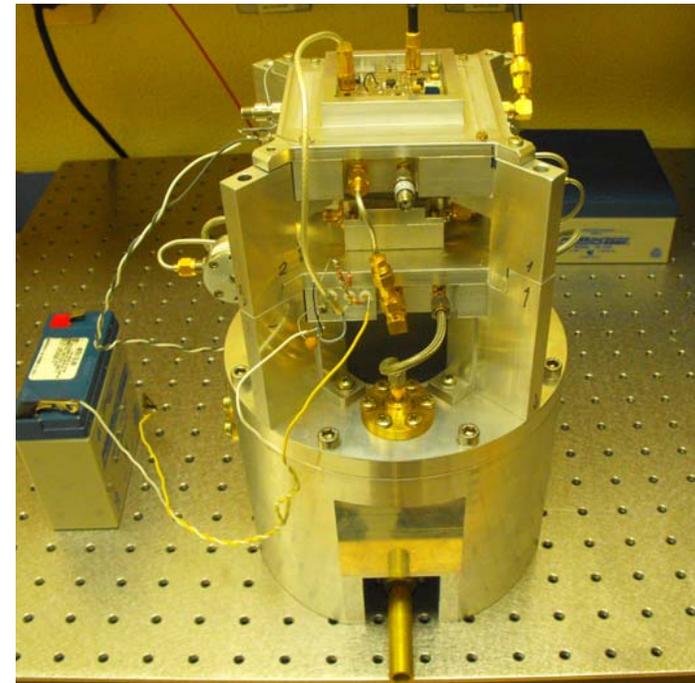
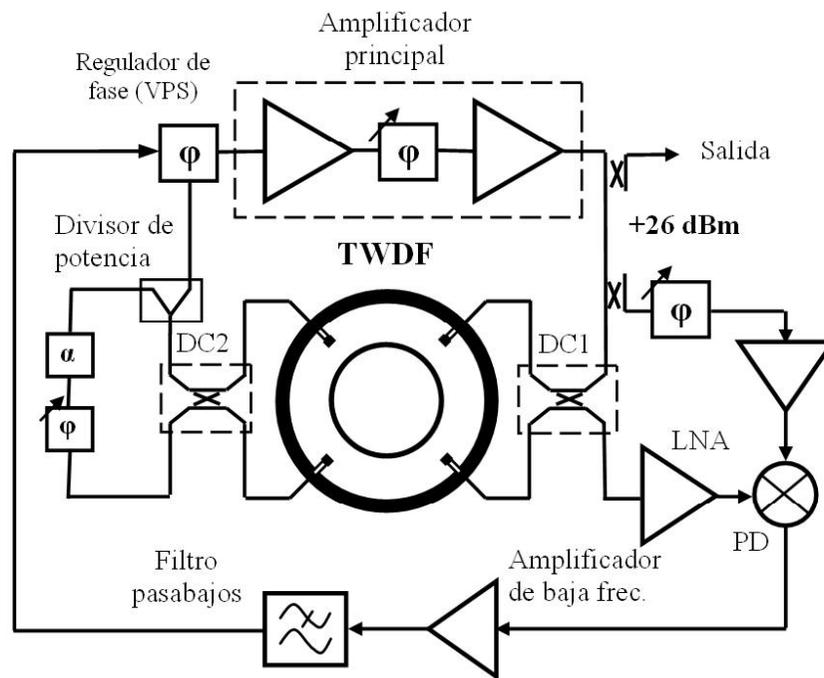
Realización experimental del oscilador de zafiro de 100 mW



$$f = 4,5712 \text{ GHz} \quad Q_0 = 220,000 \quad P_{res} = 100 \text{ mW}$$

Oscilador de Zafiro de Onda Viajera

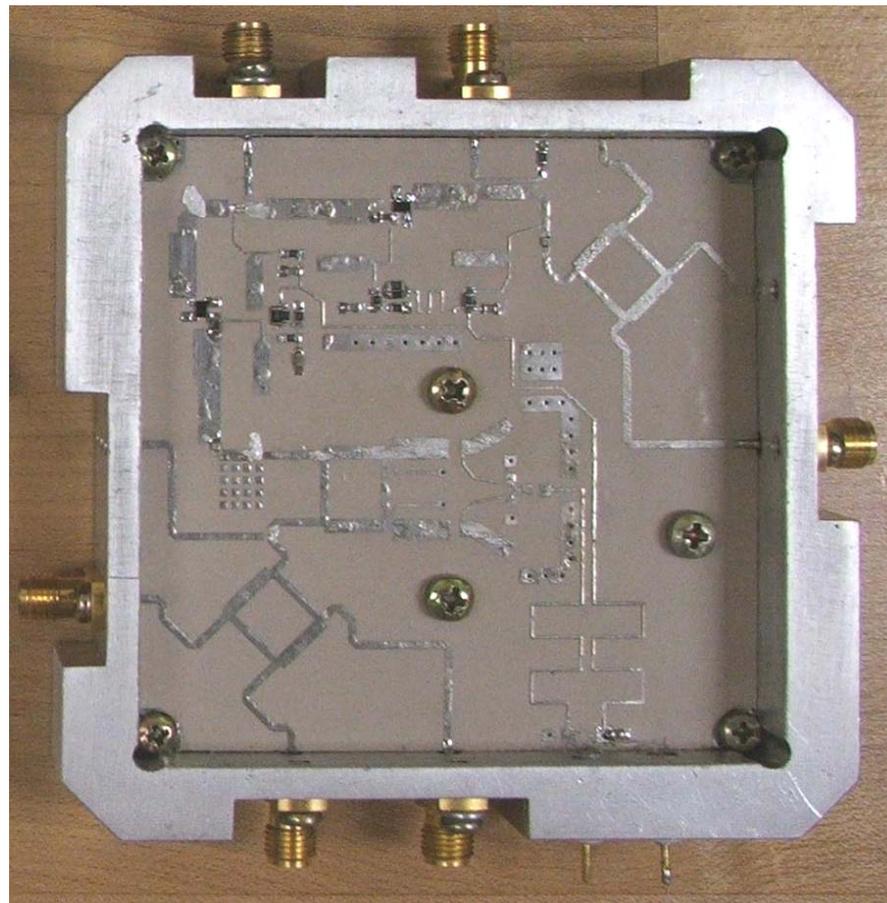
Realización experimental del oscilador de zafiro mejorado de 300 mW



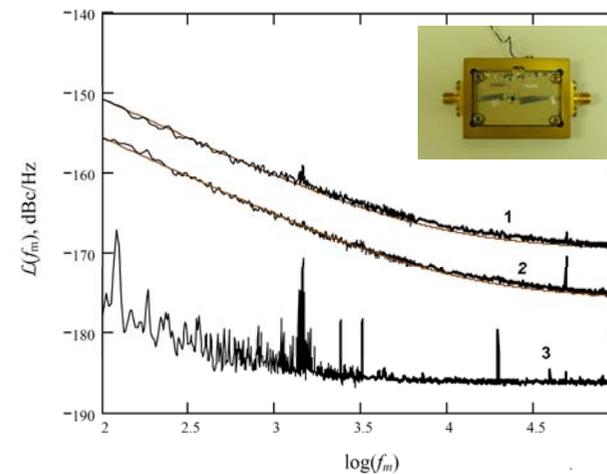
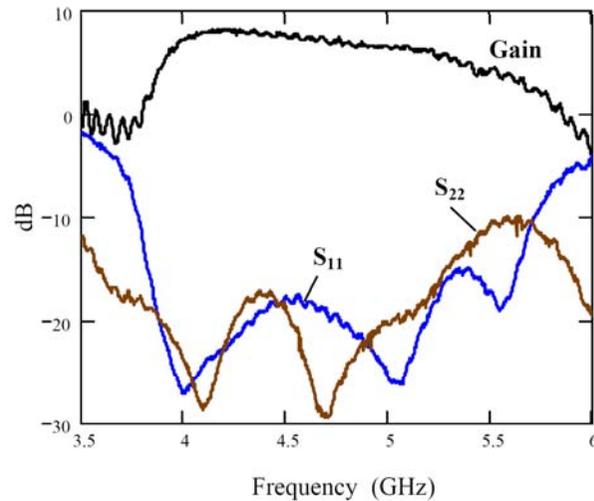
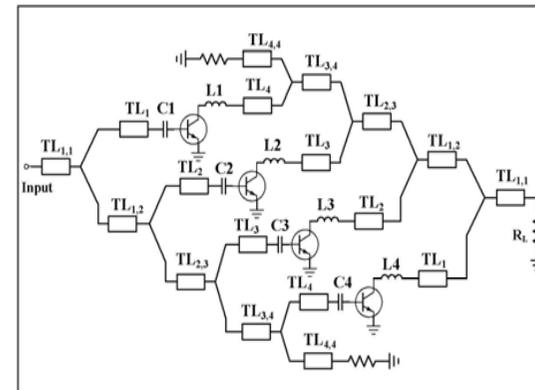
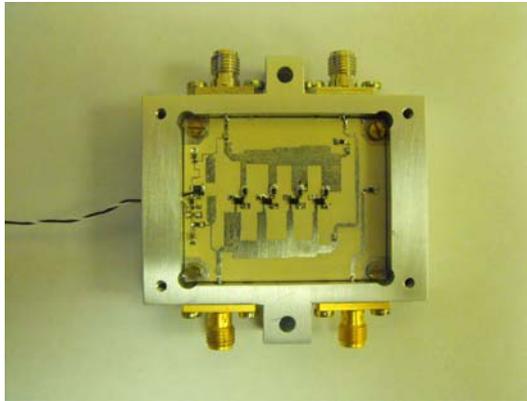
$$f = 4,5721 \text{ GHz} \quad Q_0 = 350,000 \quad P_{res} = 300 \text{ mW}$$

Oscilador de Zafiro de Onda Viajera

Lazo principal del oscilador



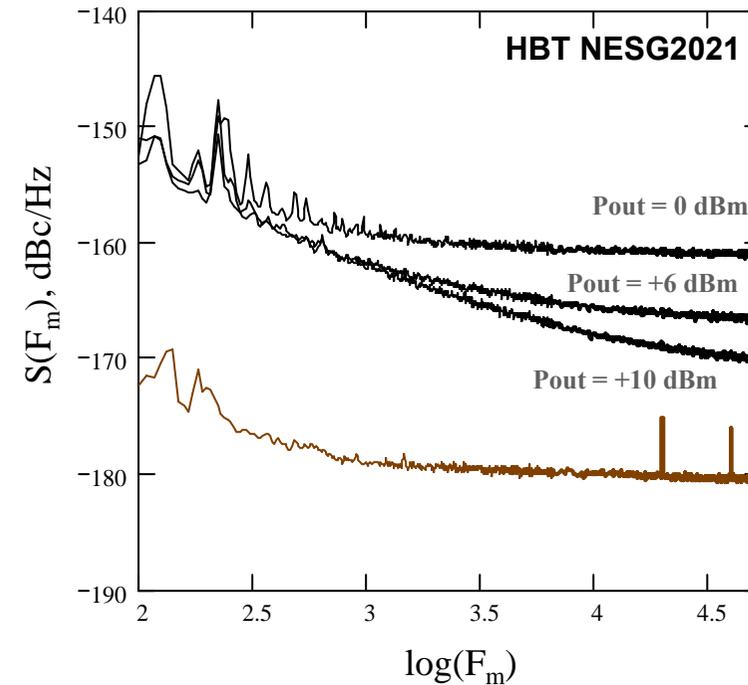
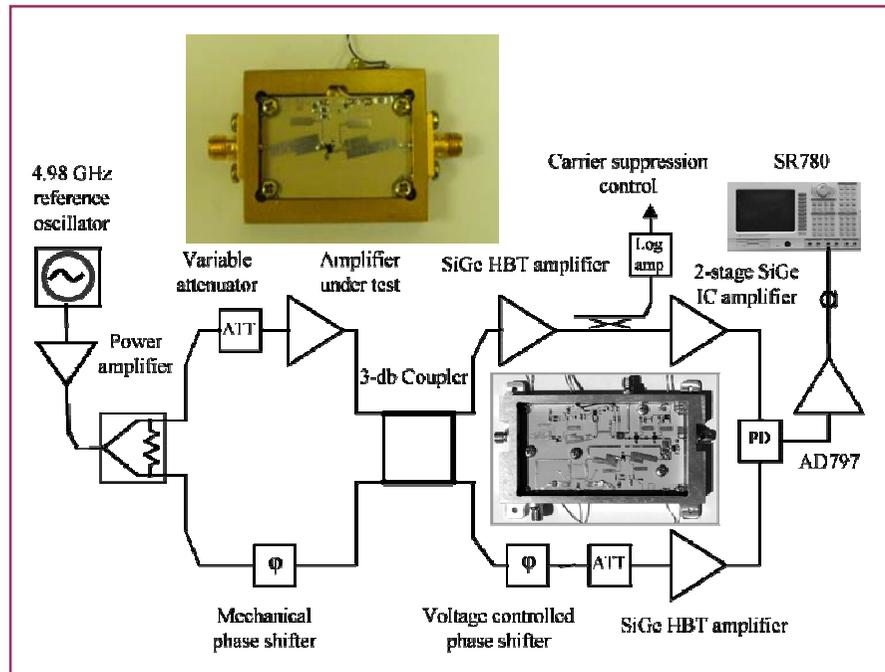
Oscilador de Zafiro de Onda Viajera



N. A. Shtin, and J. M. Lopez Romero, "Medium Power C-Band Array Amplifier Featured Ultra Low Residual Phase Noise" *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 52, No 2, 2010. (to be published)

Oscilador de Zafiro de Onda Viajera

Sistema de supresión de ruido

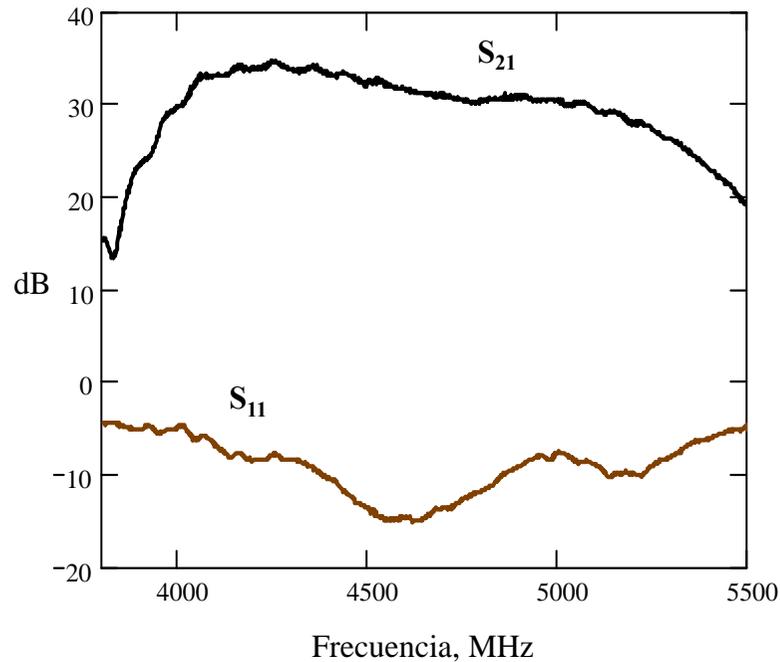


$$S_{\varphi}^{amp}(1kHz) \propto -162dBc/Hz$$

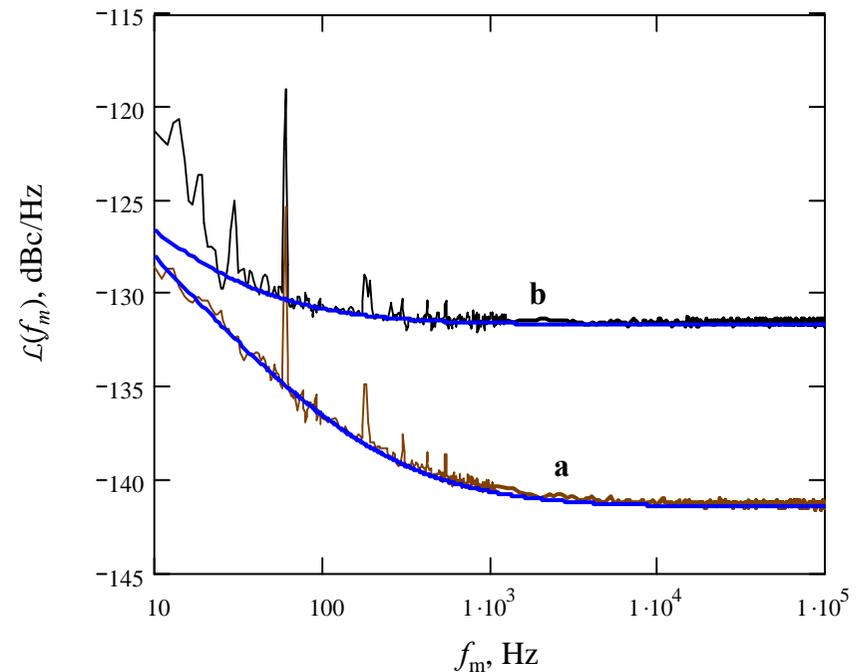
$$S_{system}(1kHz) \propto -180dBc/Hz$$

N. A. Shtin, J. M. Lopez Romero and E. Prokhorov, "Design and Characterization of Low Phase Noise C-band SiGe HBT Amplifier," in proc. ICEEE-CIE 2007, pp. 217-220.

Oscilador de Zafiro de Onda Viajera



Respuestas en frecuencia del amplificador de bajo ruido

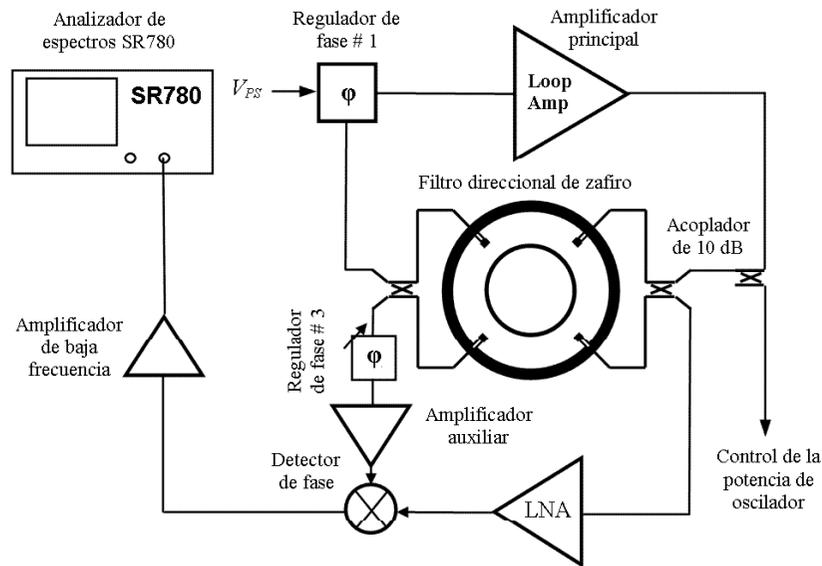


Espectro del ruido de fase del detector de fase para $G_{LNA} = 32$ dB (curva a) y para $G_{LNA} = 42$ dB (curva b)

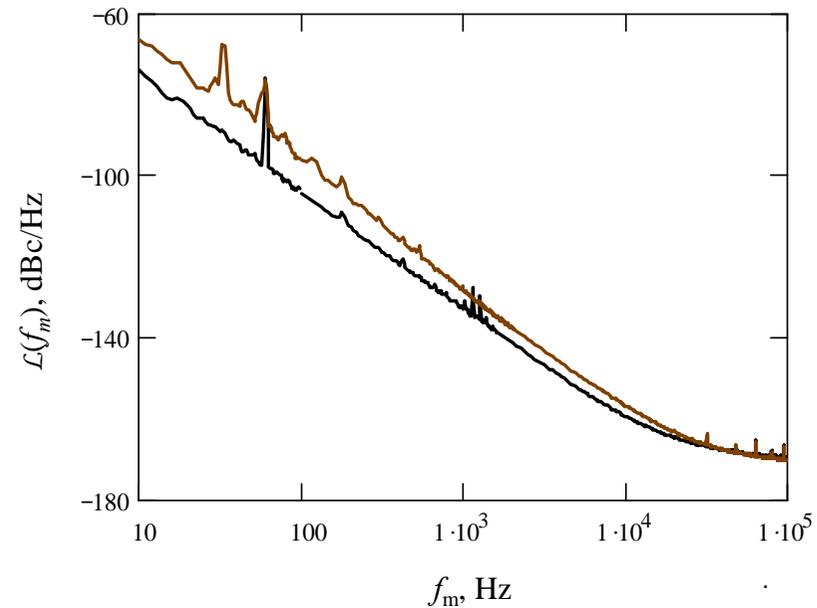
Es de notar que el nivel del ruido $1/f$ es independiente de la potencia de la señal de entrada. La densidad del dicho ruido puede ser aproximada como a_{-1}/f_m , donde $a_{-1} = 1.5 \times 10^{-12}$ (rad²/Hz).

Oscilador de Zafiro de Onda Viajera

Ruido de fase del lazo principal de oscilador



Arreglo experimental para la medición del ruido de fase de oscilador libre



Para la frecuencia de Furrier de 1 kHz el ruido de fase de los osciladores libres resulto ser: OSC#1 -128 dBc/Hz,

OSC#2 -133 dBc/Hz

Oscilador de Zafiro de Onda Viajera

Estimación del ruido de fase

$$\mathcal{L}_{\varphi}^{osc}(f_m) = \mathcal{L}_{\varphi}^{loop}(f_m) \left(K_{br} K_{pd} K_{la} K_{vps} \frac{q_{eff}}{1 + \beta_1 + \beta_2} \right)^{-2} + \mathcal{L}_{\varphi}^{pd}(f_m) \frac{B_0^2}{K_{br}^2 q_{eff}^2} \quad (1)$$

donde $B_0 = f_0/2Q_0$; β_1 y β_2 son los coeficientes de acoplamiento del resonador; K_{pd} , K_{la} , K_{br} y K_{vps} son respectivamente los coeficientes de transmisión del detector de fase, del amplificador de baja frecuencia, del puente de cancelación de la portadora y del regulador de fase controlado por voltaje; el parámetro q_{eff} caracteriza el cociente de la conversión FM-PM del resonador y se define como:

$$q_{eff} = \frac{1}{1 - \beta_1 + \beta_2} - \frac{1}{1 + \beta_1 + \beta_2} \quad (2) \quad \mathcal{L}_{\varphi}^{pd}(f_m) = \frac{kT_k NF}{P_{inc} L_{br} \Gamma_0} + \frac{a_{-1}}{f_m} \quad (3)$$

donde k es la constante de Boltzmann; T_k es temperatura en Kelvins; P_{inc} es la potencia en la entrada del FD; NF es la figura de ruido del amplificador de bajo ruido incorporado en el DF; L_{br} es el cociente de supresión de portadora del puente; Γ_0 es un parámetro que describe las pérdidas de reflexión, el cual viene dado por:

$$\Gamma_0 = (1 - \beta_1 + \beta_2) / (1 + \beta_1 + \beta_2) \quad (4)$$

Oscilador de Zafiro de Onda Viajera

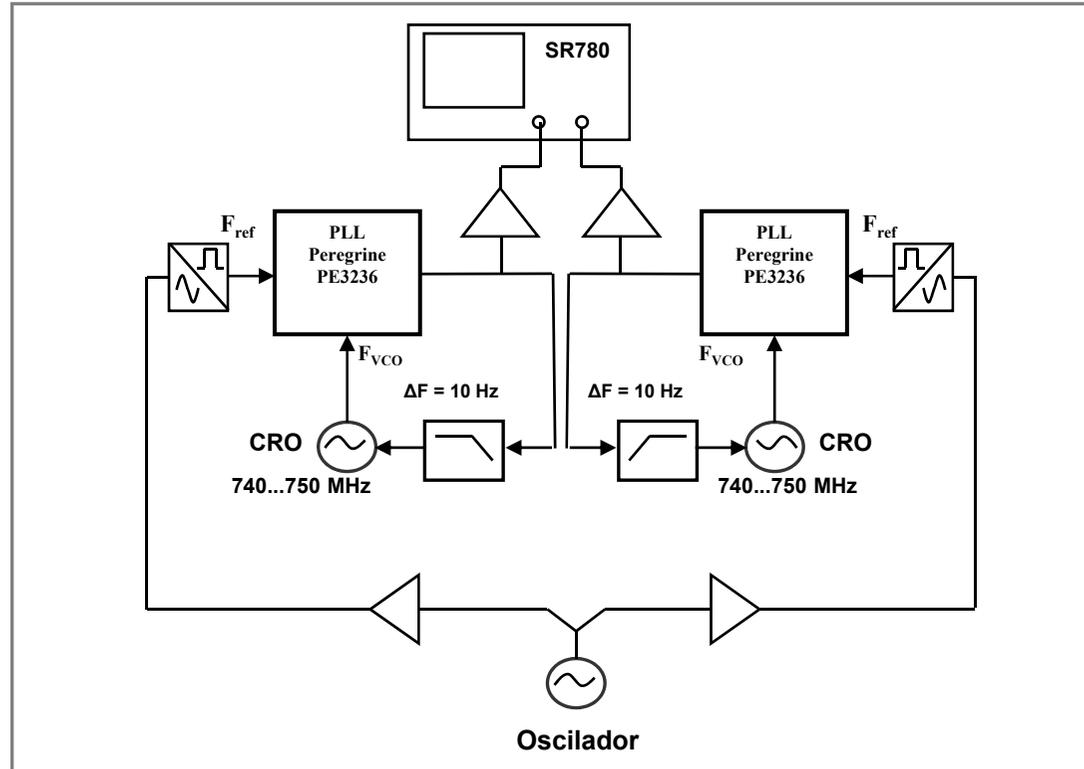
Estimación del ruido de fase

Para la estimación del ruido de fase del oscilador de 100 mW podemos asumir los siguientes parámetros: $P_{inc} = 100$ mW, $f_0 = 4.57$ GHz, $Q_0 = 220,000$, $\beta_1 = 1.09$, $\beta_2 = 0.15$, $NF = 1$ dB, $L_{br} = 30$ dB, $G_{LNA} = 32$ dB, substituyéndolos en las ecuaciones (1-4) se obtiene la siguiente estimación: $L_{\varphi}^{OSC1}(1 \text{ kHz}) = -165$ dBc/Hz.

Para el oscilador mejorado asumiendo $P_{inc} = 300$ mW, $f_0 = 4.57$ GHz, $Q_0 = 350,000$, $\beta_1 = 1.09$, $\beta_2 = 0.15$, $NF = 1$ dB, $L_{br} = 30$ dB, $G_{LNA} = 32$ dB se obtiene: $L_{\varphi}^{OSC2}(1 \text{ kHz}) = -174$ dBc/Hz.

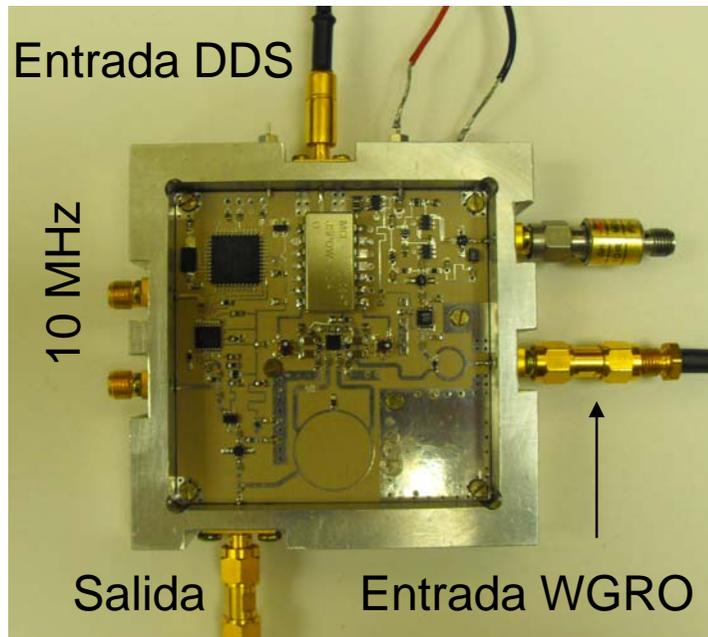
Trabajo para el futuro

Medición de ruido de fase



$$S_{crossc}(f_m) = \frac{S_{system1}(f_m) + S_{system2}(f_m)}{\sqrt{N_{avg}}} \quad N_{avg} = 10000 \quad S_{system}(1kHz) \propto -175dBc / Hz$$

Trabajo para el futuro



$$L_{osc}(1kHz) \propto -150dBc / Hz$$

References

- [1] E. N. Ivanov, M. E. Tobar and R. A. Woode, "Advanced Phase Noise Suppression Technique for Next Generation of Ultra Low-Noise Microwave Oscillators", in Proc. 1995 IEEE Int. Freq. Contr. Symp., pp. 314-320.
- [2] E. N. Ivanov, and M. Tobar, Low Phase-Noise Microwave Oscillators with Interferometric Signal Processing, Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 54, No. 8, pp. 3284-3294, 2006.
- [3] N. Shtin, J. M. Lopez Romero and E. Prokhorov, Development of ultra low phase noise oscillators at CENAM, in Proc. of the 22nd European Frequency and Time Forum (EFTF 2008), Toulouse, France, April 23-25, 2008.
- [4] N. Shtin, J. M. Lopez Romero and E. Prokhorov, Design and Performance of Ultra Low Phase Noise Reflection Whispering Gallery Resonator Oscillator, Microwave and Opt. Technol. Lett., Vol. 49, No 8, pp. 2026-2030, 2007.
- [5] N. Shtin, and J. M. Lopez Romero, Medium Power C-Band Array Amplifier Featured Ultra Low Residual Phase Noise, Microwave and Opt. Technol. Lett., to be published.