### CONVERSOR TÉRMICO DE MULTIUNIONES DE PELÍCULAS DELGADAS SOBRE UN CHIP DE CUARZO PARA ALTAS FRECUENCIAS

L. Scarioni <sup>(1)</sup>, M. Klonz <sup>(2)</sup>

 (1) Universidad de Carabobo, Facultad de Ciencias y Tecnología, Departamento de Física, Valencia, Venezuela. Iscarion@uc.edu.ve
(2) Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany. Manfred.Klonz@ptb.de

### Resumen:

Un nuevo conversor térmico de multiuniones de películas delgadas sobre una membrana y un chip de cuarzo, ha sido desarrollado como patrón para la medición de diferencias ac-dc transfer en el rango de 100 kHz a 100 MHz. La ventana con la membrana para el conversor térmico fue anisotropicamente grabada en el chip de cristal de cuarzo y la estructura bifilar del calefactor y los termoelementos fueron fabricados utilizando procedimientos fotolitograficos. Los conversores térmicos fabricados muestran una diferencia ac-dc transfer por debajo de 5  $\mu$ V/V en el rango de frecuencia de 100 kHz a 1 MHz, para resistencias del calefactor de 1 kΩ. Ésta es una reducción de más de un orden de magnitud de la diferencia ac-dc transfer en comparación con el conversor térmico fabricado sobre una membrana de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> y chip de silicio. Este nuevo conversor térmico sobre membrana y sustrato de cuarzo permite disminuir la incertidumbre estándar a 1  $\mu$ V/V en el rango de frecuencia de 100 kHz a 500 kHz y a 2  $\mu$ V/V para 700 kHz a 1 MHz. Los valores calculados de las incertidumbres fueron validadas con las mediciones de la diferencia transfer entre dos PMJTCs con resistencias del calefactor de 350 Ω y 700 Ω para frecuencias desde 100 kHz a 100 MHz.

### 1. INTRODUCCIÓN

Avances recientes en el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) se centraron en la fabricación y evaluación de nuevos diseños de conversores térmicos de multiuniones de películas delgadas (PMJTCs) fabricados sobre una membrana y chip de cuarzo [1].

La ventana con la membrana fue grabada anisotropicamente en la parte posterior del chip de cuarzo. El calefactor de películas delgadas de forma bifilar y la serie de 100 termopares fueron fabricados usando técnicas fotolitográficas convencionales (Fig. 1).

Los PMJTCs fabricados sobre chip y membrana de cuarzo presentan diferencias transfer ac-dc de voltaje por debajo de 5  $\mu$ V/V en el rango de frecuencia de 100 kHz a 1 MHz para resistencias del calefactor menores a 1 k $\Omega$ . Esto representa una reducción de más de un orden de magnitud de la diferencia transfer ac-dc de voltaje en comparación al PTB-PMJTC fabricado sobre un chip de silicio con la misma resistencia del calefactor [2].



*Fig. 1.* Fotografía de un conversor térmico sobre membrana y chip de cuarzo.

# 2. DIFERENCIAS TRANSFER AC-DC DE VOLTAJE A ALTAS FRECUENCIAS

La Fig. 2 muestra los resultados de la medición de las diferencias transfer ac-dc de voltaje de PMJTCs fabricados sobre membrana y chip de cuarzo con diferentes resistencias del calefactor. El efecto Skin en los hilos de conexión incrementa la diferencia transfer ac-dc a valores positivos para resistencias del calefactor de 240  $\Omega$ . Para resistencias del calefactor mayores, la influencia del efecto "Skin" disminuye, pero la influencia de la capacitancia entre los puntos de contacto del calefactor, la capacitancia entre el calefactor y los termopares y entre los dos hilos del calefactor incrementan la diferencia transfer ac-dc a valores negativos.

Para una resistencia del calefactor de aproximadamente 700  $\Omega$ , el efecto Skin y los efectos capacitivos se compesan el uno con el otro.



**Fig. 2** Mediciones a altas frecuencias de la diferencias transfer ac-dc de voltaje  $\delta_u$  para termoconversores con diferentes resistencias del calefactor  $R_{\rm H}$  fabricados sobre un chip de cuarzo.

### 3. MODELO PARA LA SIMULACIÓN

Para calcular la diferencia transfer ac-dc de voltaje del conversor fabricado sobre cuarzo, se desarrollo un modelo del cuarzo-PMJTC. Este modelo toma las contribuciones a la diferencia transfer provenientes de:

- El cambio en la parte real con la frecuencia de la impedancia <u>Z</u> del calefactor.
- Capacitancia entre los hilos de conexión, puntos c y d (Fig. 3) y capacitancia entre los puntos de contacto del calefactor.
- 3) Ondas estacionarias en los conectores de entrada, punto **a** y punto **b**.
- 4) Efecto "Skin" en los hilos de conexión.

Estas contribuciones fueron analizadas y calculadas como se describe en las secciones siguientes.



**Fig. 3** Diagrama del PMJTC de cuarzo con las entradas T punto a y N-conector punto b. Los hilos de conexión, punto c desde el conector hasta la cerámica y los hilos de Au, punto d desde la cerámica hasta el chip.

### 3.1. Impedancia <u>Z</u> del Calefactor

Para determinar la dependencia con la frecuencia de la parte real de la impedancia del calefactor, fue desarrollado un modelo eléctrico basado en [3]. El calefactor del conversor es modelado como una línea de transmisión de 10 elementos sin perdida. Todas las simulaciones son realizadas desde 10 kHz a 100 MHz y la diferencia transfer ac-dc se calcula con la siguiente ecuación [3]:

$$\delta_{ac-dc} = \frac{|\underline{Z}|}{\sqrt{R_H \operatorname{Re}\{\underline{Z}\}}} - 1 \tag{1}$$

donde:

 $R_{\rm H}$  = resistencia del calefactor  $|\underline{Z}|$  = modulo de la Impedancia del calefactor Re{Z }= parte real de la impedancia del calefactor

### 3.2. Capacitancia en los hilos de conexión

Para el cálculo de la diferencia transfer ac-dc de voltaje debido a capacitancia entre los hilos de conexión y capacitancia entre los puntos de contacto del calefactor se utilizó el modelo mostrado en la Fig. 4. Este modelo incluye: capacitancia  $C_{\rm wCu}$  entre los hilos de cobre,  $C_{\rm wAu}$  entre los hilos de oro, entre los puntos de contacto del calefactor  $C_c$ , perdidas dieléctricas en el cuarzo  $G_{\rm cuarzo}$  y en la cerámica  $G_{\rm ceramica}$  y la inductancia y resistencia de los hilos de cobre y oro respectivamente,  $L_{\rm Cu} R_{\rm Cu}, L_{\rm Au}$ ,  $R_{\rm Au}$ . La diferencia transfer ac-dc de voltaje fue calculada desde 100 kHz a 100 MHz con la siguiente ecuación:

$$\delta_{U_2} = \frac{|\underline{Z}| \cdot |\underline{Z}_2 \cdot (\underline{Z}_5 + \underline{Z}_7)|}{(2R_{C_u} + 2R_{A_u} + R_H) \cdot |\underline{Z}_5 \cdot (\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}_1)|} - 1 \quad (2)$$

 $|\underline{Z}|$  es el módulo de la impedancia del calefactor con los hilos de conexión y

$$\underline{Z}_{1} = (R_{Cu} + j\omega L_{Cu}) = \underline{Z}_{3}$$
$$\underline{Z}_{2} = (G_{ceramica} + j\omega C_{wCu})^{-1}$$
$$\underline{Z}_{5} = [G_{cuarzo} + j\omega (C_{wAu} + C_{c})]^{-1}$$
$$\underline{Z}_{7} = (R_{H} + j\omega L_{H})$$



**Fig. 4** Modelo del calefactor con los hilos de conexión.

## 3.3. Ondas Estacionarias en los conectores de entrada

Debido a que la impedancia de entrada del PMJTC es mucho mayor que la impedancia característica (  $50 \Omega$  ) de la línea coaxial de los conectores T y N, el voltaje en el plano **a** difiere significativamente del voltaje en el plano **b** ( Fig.3 ). La diferencia transfer ac-dc de voltaje debido a ondas estacionarias en los conectores de entrada fue calculada para frecuencias desde 1 MHz a 100 MHz con la siguiente ecuación:

$$\delta_{\rm U3} = -\frac{1}{2} \cdot \vec{L} \cdot \vec{C} \cdot \omega^2 \cdot l^2 \cdot \left| 1 - \frac{Z_0^2}{Z_{\rm L}^2} \right|$$
(3)

con  $Z_o$  impedancia característica de la línea 50  $\Omega$ ,  $Z_L$  impedancia de entrada del PMJTC, *l* la longitud de la línea, *L*' y *C*' la inductancia y capacitancia por unidad de longitud de la línea respectivamente.

La contribución de este efecto a la diferencia transfer es de  $-38 \ \mu V/V$  para una resistencia del calefactor de 700  $\Omega$  y para una frecuencia de 10 MHz.

### 3.4. Efecto "Skin" en los hilos de conexión

La contribución a la diferencia transfer ac-dc debida al efecto "Skin" en los hilos de conexión fue calculada de acuerdo a [4]. Este efecto contribuye a la diferencia transfer ac-dc con 7  $\mu$ V/V a 1 MHz, 63  $\mu$ V/V a 10 MHz y 250  $\mu$ V/V a 100 MHz, para una resistencia del calefactor de 700  $\Omega$ . Esta componente de mayor contribución para una resistencia del calefactor de 700  $\Omega$  a una frecuencia de 1 MHz.

### 4. MEJORA DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA EN EL RANGO DE 10 MHZ A 100 MHZ DEL PMJTC SOBRE CUARZO

Para disminuir la gran contribución a la diferencia transfer ac-dc en el rango de 10 MHz a 100 MHz, que proviene de los hilos de conexión y ondas estacionarias en los conectores de entrada, se diseñó y construyó una estructura para el montaje de los PMJTC, con el conector tipo T incorporado (Fig. 5)



**Fig. 5** Estructura con conector tipo T incorporado y conector para el TVC estándar

La Fig. 6 muestra una comparación entre las mediciones realizadas con la estructura estándar y con la estructura con conector tipo T incorporado, para una resistencia del calefactor de 1000  $\Omega$ . Estas mediciones fueron realizadas utilizando el PTB-MJTC tridimensional estándar como referencia.



**Fig. 6** Comparación entre mediciones de la diferencia transfer con la estructura estándar y con la estructura con conector tipo T incorporado.  $R_{\rm H} = 1000 \ \Omega.$ 

### 5. VALIDACION DEL MODELO

Para validar el modelo utilizado, se realizó una comparación de las diferencias transfer, medidas y calculadas entre dos PMJTCs con diferentes resistencias del calefactor. Los dos PMJTCs fueron conectados en paralelo por hilos cortos y delgados. El voltaje de entrada se conectó al punto medio de esos hilos. La Fig. 7 muestra los valores medidos y calculados de la diferencia transfer entre dos PMJTCs con resistencias del calefactor de 350  $\Omega$  y 700  $\Omega$  para frecuencias desde 100 kHz a 1 MHz y la Fig. 8 para frecuencias de 10 MHz a 100 MHz. Los valores medidos están dentro de las incertidumbres calculadas. Estos resultados soportan la validez del modelo utilizado.



**Fig. 7** Diferencias transfer medidas y calculadas entre dos PMJTCs con resistencias del calefactor de 350  $\Omega$  y 700  $\Omega$  para frecuencias de 100kHz a 1 MHz.



**Fig. 8** Diferencias transfer medidas y calculadas entre dos PMJTCs con resistencias del calefactor de 350  $\Omega$  y 700  $\Omega$  para frecuencias de10 MHz a 100 MHz

#### CONCLUSIONES

Se ha fabricado y evaluado una nueva generación de PMJTCs sobre un cristal y una membrana de cuarzo para voltajes de 2 a 10 V y para frecuencias de 100 kHz a 100 MHz. Las diferencias transfer ac-dc de voltaje son menores a 2 µV/V a 100 kHz, menores a 30 µV/V a 1 MHz y del orden de -7 mV/V a 100 MHz para una resistencia del calefactor de 240  $\Omega$ . Para una resistencia del calefactor de 700  $\Omega$ la diferencia transfer es menor a 2  $\mu$ V/V a 1 MHz. El modelo presentado permite calcular la incertidumbre estándar de la diferencia tranfer: 1 µV/V para frecuencias de 100 kHz a 500 kHz , 1.5  $\mu$ V/V de 700 kHz a 1 MHz y 160 μV/V a 100 MHz [5]. Las diferencias tranfer ac-dc del PTB-MJTC tridimensional estándar fueron corregidas tomando los valores calculados del nuevo cuarzo-PMJTC en el rango de 100 kHz a 1 MHz, a partir de Octubre del 2003 (Fig 9).



**Fig. 9** Diferencias Transfer ac-dc de voltaje del MJTC tridimensional del PTB No. 218 calculadas en 1990 y en el 2003 y barras de incertidumbre con k = 2.

### REFERENCIAS

- [1] L. Scarioni , M. Klonz, D. Janik, H. Laiz, and M. Kampik, "High-Frequency Thin-Film Multijunction Thermal Con-verter on a Quartz Crystal Chip," <u>IEEE Trans. Instrum. Meas</u>. Vol. 52, No.2, pp 345-348, April 2003.
- [2] M. Klonz, H. Laiz, E. Kessler, "Development of Thin-film Multijunction Thermal Converters in PTB/ IPHT," <u>IEEE Trans. Instrum. Meas.</u>, vol. 50, pp.1490-1498, Dec. 2001.
- [3] M. Klonz, "Entwicklung von Vielfachthermokonvertern zur genauen Rückführung von Wechselgrößen auf äquivalente Gleichgrößen, "PTB-Bericht E-29, Braunschweig1987.
- [4] K. Küpfmüller, Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Springer-Verlag, Berlin 1959.
- [5] L. Scarioni, "High-Frequency Thin-Film Multijunction Thermal Converter on a Quartz Crystal Chip," Ph.D. dissertation, Tech. Univ. Braunschweig, PTB-Report E-83, Germany, September 2003.