

LABORATORIO DE MEDIDAS SOBRE OBLEA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS PASIVOS DE RADIO FRECUENCIA (RF)

I. Gutiérrez¹, A.García-Alonso², R.Berenguer², J.Meléndez², G. Bistué² y J.de Nó²

¹ Tecnun (Universidad de Navarra)

Manuel de Lardizábal 13, 20018 San Sebastián, España.
(Tel: +34943219877, fax: +34943311442, ingutierrez@tecnun.es)

² CEIT y Tecnun (Univerisdad de Navarra)

Manuel de Lardizábal 15, 20018 San Sebastián, España

Se presenta la asignatura de doctorado Caracterización de Elementos Pasivos para RF. En dicha asignatura se enseña a los estudiantes de postgrado como caracterizar de una forma completa, elementos pasivos que tengas aplicaciones en RF. Los elementos pasivos que se aprenden a caracterizar son los inductores y los varactores integrados. El proceso seguido para la caracterización de dichos elementos es ,en primer lugar, familiarizarse con los equipos de medida, a continuación se trata de hallar los parámetros S del elemento pasivo y por último, mediante un proceso de de-embedding, eliminar de la medida todo aquello que no corresponda propiamente a la medida.

1. Introducción

Se presenta el laboratorio de medidas sobre oblea (*On-Wafer*), donde se imparte la asignatura de doctorado Caracterización de Componentes Pasivos para RF. Dicha asignatura forma parte del programa de doctorado en Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de Navarra.



Figura 1. Laboratorio de Medidas sobre Oblea

La tendencia del sector de las comunicaciones sin cable se encamina hacia equipos de comunicaciones móviles que permitan una conectividad total y que sean capaces de manejar señales de voz, datos, imágenes e incluso den la posición del usuario sobre el globo terrestre y tengan capacidad de cálculo (PCS: *Personal Communication Services*).

Tradicionalmente la demanda de estos equipos se ha satisfecho mediante sistemas MCMs (*MultiChip Modules*), o fundamentalmente con circuitos, tanto integrados como discretos montados sobre PCBs, basados ambos en tecnologías III-V maduras. Sin embargo, estas tecnologías son de alto coste y volumen de producción limitado; pocas son las fundidoras que las ofrecen. Por contra, el mercado exige componentes y/o circuitos de radiofrecuencia (RF) pequeños, baratos, de bajo consumo y producción masiva. De modo que los grupos de investigación y, en especial, las empresas de diseño y fabricación de sistemas para RF, dirigen en la actualidad su mirada a las tecnologías de circuitos integrados estándar de silicio: CMOS, BiCMOS y SiGe.

Gracias a la reducción de sus dimensiones, los dispositivos activos en estas tecnologías alcanzan ya las frecuencias requeridas. Sin embargo, lo mismo no se puede decir de sus dispositivos pasivos: varactores e inductores que se van conformando como uno de los cuellos de botella en la producción de sistemas completamente integrados.

El laboratorio de medidas sobre oblea para la caracterización de elementos pasivos de RF es una asignatura de laboratorio donde el alumno de postgrado aprenderá a caracterizar inductores y varactores integrados para aplicaciones de RF. En la Figura 1 se muestra una fotografía del laboratorio donde se realiza esta asignatura de doctorado.

2. Objetivos

Los objetivos que se buscan en dicho laboratorio son:

- Dominar los sistemas de caracterización de elementos pasivos, principalmente el analizador vectorial de redes (VNA), para la obtención de parámetros S de inductores y varactores integrados hasta 6 GHz.
- Aprender a utilizar las técnicas de *de-embedding* para poder eliminar de la medida los efectos parásitos incluidos en las estructuras de medida.

3. Sistema de Medida

El sistema de medida es el conjunto de aparatos, cables, conectores y puntas de medida utilizados en la caracterización de un componente pasivo. Se utiliza el analizador de redes HP 8719 ES ya que su rango de trabajo esta entre los 50 MHz y los 13.5 GHz, e incluye por tanto el rango de RF. Las puntas de medida sirven como adaptadores entre los cables medida y los *pads* de la estructura de medida. Se han usado las más habituales en las medidas de radiofrecuencia, las *Air Coplanar Probes (ACP)* de *Cascade Microtech*.

En la Figura 2 se presenta el sistema de medida utilizado para la caracterización de elementos pasivos integrados, para así obtener los parámetros S de los mismos.

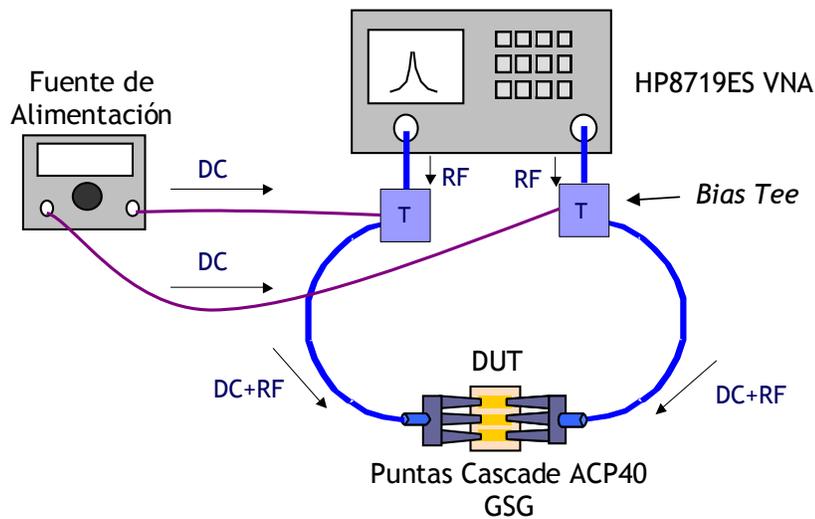


Figura 2. Sistema de Medida

Para asegurar que las medidas son fiables, el plano de referencia del sistema de medida se fija lo más cercano posible al elemento a medir, es decir, en el extremo de las puntas de medida. Situar el plano de referencia en el punto deseado se conoce como calibración del sistema. Existen muchos métodos de calibración, con ciertas ventajas y desventajas, optándose por usar la calibración *Short-Open-Load-Thru (SOLT)*. Existen otros métodos de calibración como el LRM o el LRRM que podrían ser considerados como válidos, pero se opta por el SOLT ya que este no depende de la tecnología, por lo que es un método más general.

4.- Estructuras de Medida

Debido a que las medidas de los inductores y varactores se realizan sobre oblea ya que dichos componentes están integrados, se diseñan y fabrican unas estructuras que permiten la interconexión entre las puntas de medida y los elementos pasivos integrados. Dichas estructuras se denominan estructuras de medida. La importancia de dichas estructuras reside en la necesidad de que el contacto entre el sistema de medida y los elementos pasivos permita la caracterización de los mismos, y que a su vez introduzca la menor influencia de los efectos parásitos.

Las estructuras de medida están preparadas para medir los varactores en dos puertos y cada puerto será del tipo GSG (tierra-signal-tierra). En la Figura 3 se muestra una microfotografía de un varactor integrado con su correspondiente estructura de medida.

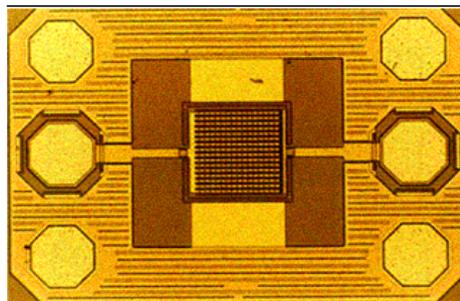


Figura 3.- Estructura de Medida

4. Proceso de *de-embedding*

Una vez definidas las estructuras de medida se pasa a explicar cada uno de los efectos parásitos que introducen para de esta forma elaborar un sistema de *de-embedding* eficiente.

En la Figura 4 se presenta el modelo equivalente de cada uno de los efectos parásitos introducidos por las estructuras de medida. Si los puertos de medida se separan más de $400\mu\text{m}$ se pueden despreciar las pérdidas de acoplamiento.

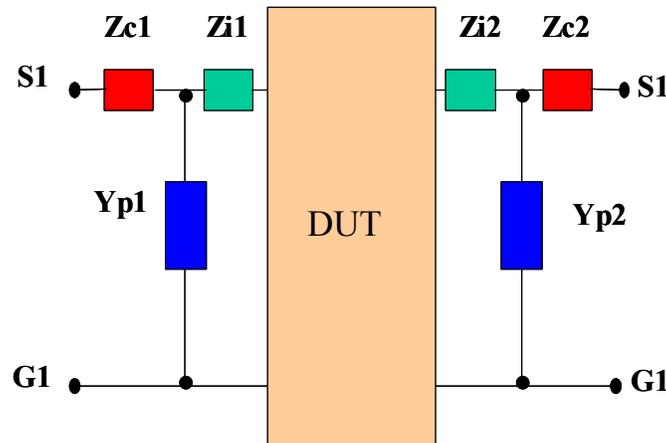


Figura 4. Modelo de impedancias de una estructura de medida

La resistencia de contacto (Z_c) representa las pérdidas óhmicas que se producen debido al contacto entre las puntas y la estructura de medida junto con las pérdidas producidas en el *pad*. Al tener las estructuras de medida un diseño de dos puertos, existirá resistencia de contacto en ambos puertos (Z_{c1} y Z_{c2}). Debido a que los *pads* están diseñados con capas de polisilicio y capas metálicas, aparecen entre los *pads* y tierra unas capacidades parásitas por lo que se producen unas pérdidas debido a este autoacoplamiento. Dicho autoacoplamiento se dará en ambos puertos (Y_{p1} e Y_{p2}).

Para conectar los *pads* de señal con el dispositivo a medir se utilizan pistas metálicas por las que circularía la señal. Dichas pistas de conexión generan unas pérdidas óhmicas en ambos puertos (Z_{i1} y Z_{i2}). El objetivo de utilizar técnicas de *de-embedding* sobre el dispositivo a caracterizar, es trasladar el plano de referencia de la medida desde los *pads* de la estructura hasta el dispositivo.

Para poder realizar el *de-embedding* utilizan tres estructuras especiales; estructura *single-open*, estructura *single-short* y estructura *thru*. El alumno ha de ser capaz de diseñarla y medirla.

En la Figura 5 se muestra una microfotografía de la estructura *single-open*. Dicha estructura se diseña conectando el *pad* de señal de ambos puertos con los de tierra. De esta forma la señal quedaría cortocircuitada a tierra en cada uno de los puertos de medida.

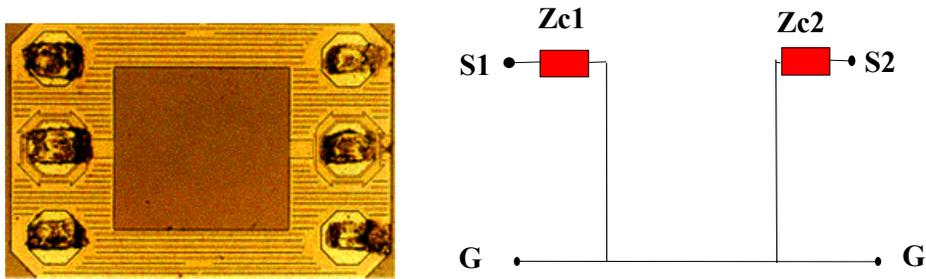


Figura 5. Microfotografía y modelo de la estructura *single-short*

El objetivo de esta estructura es medir la impedancia de contacto Z_{C1} y Z_{C2} . Al estar cortocircuitado el *pad* de señal con los de tierra, el único valor de impedancia que se obtiene es el de la resistencia de contacto.

La estructura *single-open* se diseña manteniendo aislados los *pads* de señal respecto a los de tierra en ambos puertos de media. En la Figura 6 se muestra este tipo de estructuras.

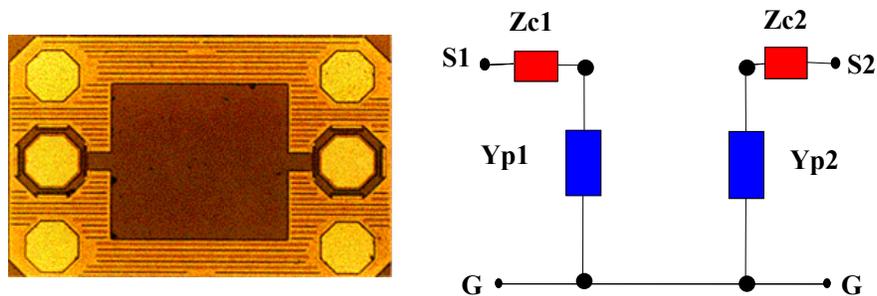


Figura 6. Microfotografía y modelo de la estructura *single-open*

Dicha estructura es utilizada para poder determinar el valor del autoacoplamiento de cada puerto (Y_{p1} e Y_{p2}). El modelo de impedancias de la medida de esta estructura incluye además de los valores de autoacoplamiento, los valores de las resistencias de contacto del puerto uno y dos.

La estructura *thru* se diseña conectando los *pads* de señal de ambos puertos mediante un metal de tamaño igual al utilizado para conectar los *pads* con los elementos pasivos. En la Figura 7 se presenta este tipo de estructuras.

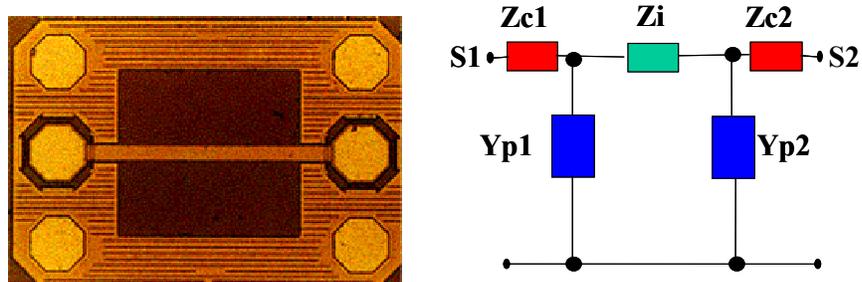


Figura 7. Microfotografía y modelo de la estructura *thru*

La medida de dicha estructura incluye además del valor de la resistencia de la línea de conexión (Z_i), los valores de la resistencia de contacto y del autoacoplamiento. Por lo tanto habrá que eliminar dichas impedancias del modelo de la estructura *thru*.

El proceso de de-embedding que se sigue comienza con la resta de la estructura *single-short* a la estructura *thru*, de esta forma el valor de Z_c es eliminado. A continuación se hace lo mismo con la estructura *single-open* por lo que se elimina el valor de Y_p . De esta forma el modelo quedaría únicamente con el valor de la impedancia de las líneas de conexión Z_i . Mediante este proceso se calcula el valor de impedancia de una línea de conexión que una los *pads* de señal de una estructura de medida de dos puertos. Como el tamaño de las líneas de conexión depende de cada elemento pasivo, su impedancia se calcula a partir del dato de Z_i total afectado por un factor de corrección dependiente del tamaño de la conexión.

En la Figura 8 se muestra un resumen del proceso de *de-embedding* empleado.

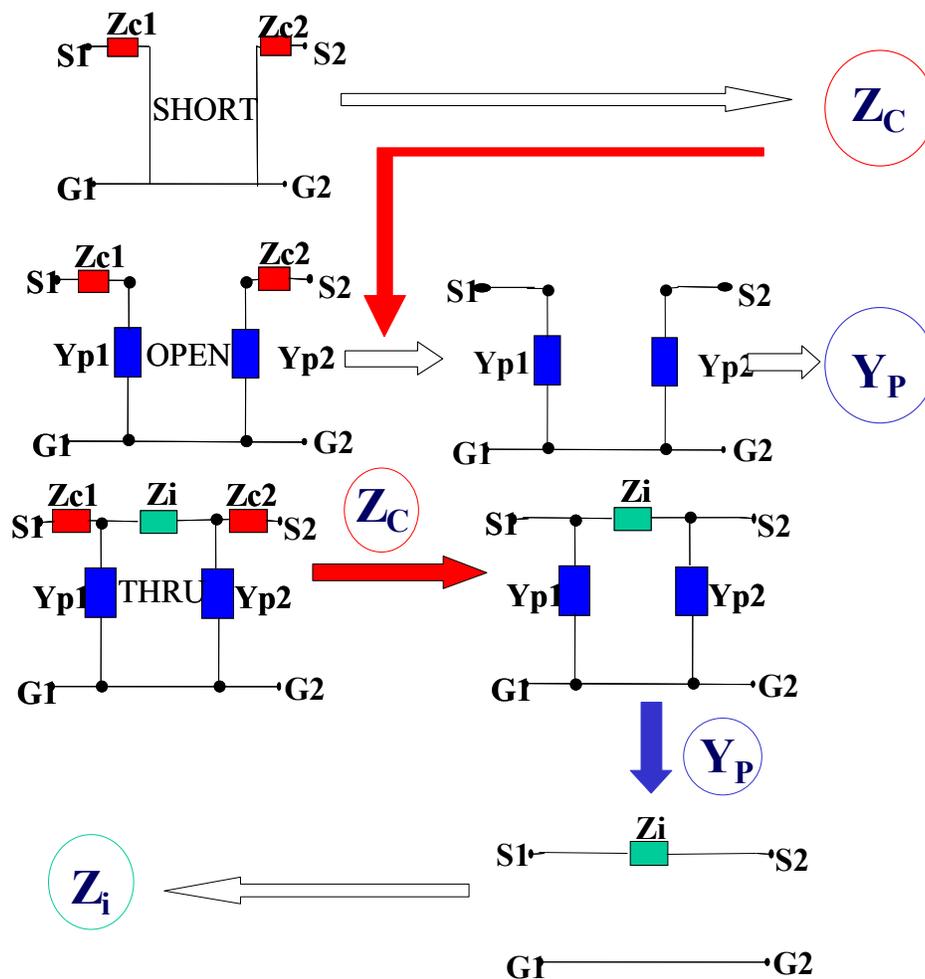


Figura 8. Proceso completo de *de-embedding*

5.- Caracterización

Para obtener los parámetros S de un elemento pasivo, se utiliza el sistema de medida explicado en el apartado 3.

Una vez que se han realizado las medidas pertinentes, se utilizan las técnicas de *de-embedding* para la eliminación de los efectos parásitos que introducen las estructuras de medida. Una vez eliminados dichos efectos parásitos es posible la obtención a partir de los parámetros S de los parámetros que definen el elemento pasivo, como son el factor de calidad Q, el valor de la resistencia y en el caso del varactor la capacidad, y en el caso del inductor de la inductancia.

En la Figura 9 se muestran los valores de los parámetros S de un elemento pasivo antes y después del proceso de *de-embedding*.

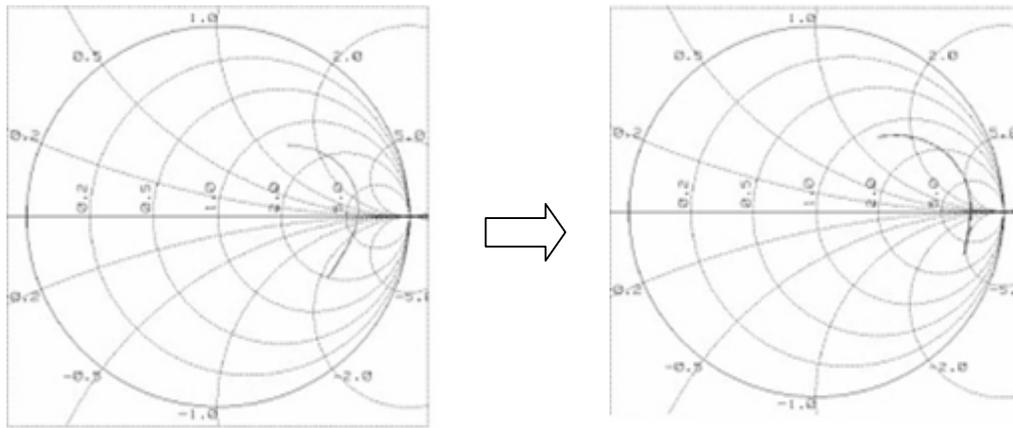


Figura 9.-Modificación de los valores de los parámetros S al utilizar las técnicas de *de-embedding*

Una vez realizado el *de-embedding* a partir de los resultados de los parámetros S de dos puertos se realiza una transformación a un puerto mediante las siguientes expresiones:

$$S_1 = S_{11} - \left(\frac{S_{21}S_{12}}{1 + S_{22}} \right)$$

$$S_2 = S_{22} - \left(\frac{S_{21}S_{12}}{1 + S_{11}} \right)$$

A partir de dichas expresiones (y después de transformar los parámetros S a parámetros Z de un puerto) se obtienen los parámetros que definen el comportamiento de los elementos pasivos integrados como son:

El factor de calidad (Q).
$$Q_{11} = - \frac{\text{Im}(Z_{11_1\text{puerto}})}{\text{Re}(Z_{11_1\text{puerto}})}$$

La resistencia del elemento pasivo.
$$R_{11} = \text{Re}(Z_{11_1\text{puerto}})$$

La capacidad del elemento pasivo.

$$C_{11} = -\frac{1}{2\pi f * \text{Im}(Z_{11_1puerto})}$$

La inductancia del elemento pasivo.

$$L_{11} = \frac{\text{Im}(Z_{11_1puerto})}{2\pi f}$$

6. Bibliografía.

- J. Maget, “Varactors and Inductors for Integrated RF Circuits in Standard MOS Technologies”, Tesis Doctoral, Munich, Diciembre 2002.
- P. Andreani, S. Mattison, “A 1.8 GHz CMOS VCO tuned by accumulation-mode MOS varactor”, Dept. of Applied Electronics, Lund University, Sweden, 1999.
- S Porret, T.Melly and C. Enz, “Design of High Q Varactors for Low-Power Wireless Applications Using a Standard CMOS Process”, IEEE Journal of Solid State Circuits, Vol.35, Nº. 3, pp 337-345 Marzo 2000.
- E. Pedersen, “RF CMOS Varactors for Wireless Applications”, Tesis Doctoral, Aalborg (Dinamarca), Febrero 2001.
- G. Amorese, “Component Measurement Seminar”, Agilent Technologies, Paris, 24 Septiembre, 2000.
- Product Quick Guide ACP40-GSG, Cascade Microtech, Octubre 1999.
- Lord Microtech Training Session, “Introduction to On-Wafer RF Probing and Error Correction”, Octubre 1999.
- Technical Brief, “A Guide to Better Vector Network Analyzer Calibrations for Probe-Tip Measurements”, Cascade Microtech, October 1999.
- T. E. Kolding, “Course on RF On-Wafer Device Measuring Techniques”, Aalborg University , Octubre 2000.
- J. Aguilera, R. Berenguer, “Design and Test of Integrated Inductors for RF Applications”, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- E.Hernández, “Integración de un Corversor de Frecuencia para TV en Tecnología SiGe 0,8 μm ”, Tesis Doctoral, TECNUN, Diciembre 2002.