

Amplificador de potencia clase F en banda L basado en tecnología GaN

David Tena Ramos, Moisés Patiño Gómez, Francisco Javier Ortega González,
José Manuel Pardo Martín y César Benavente Peces.

dtenaramos@gmail.com, moisespatino@alumnos.upm.es, fjortega@diac.upm.es,
jmpardo@diac.upm.es, cbpeces@ics.upm.es.

Universidad Politécnica de Madrid, Grupo de Ingeniería de Radio, EUIT de Telecomunicación,
Carretera de Valencia Km. 7, 28031, Madrid, España.

Abstract- This paper reports a high efficiency class-F power amplifier based on a gallium nitride high electron mobility transistor (GaN-HEMT), which is designed at the L band of 1640 MHz. The design is based on source and load pull measurements. During the design process, the parasitics of the package of the device are also taken into account in order to achieve the optimal class-F load condition at the intrinsic drain of the transistor. The fabricated class-F power amplifier achieved a maximum drain efficiency (DE) of 77.8% and a output power of 39.6 W on a bandwidth of 280 MHz. Simulation and measurement results have shown good agreement.

I. INTRODUCCIÓN

Los actuales transmisores para comunicaciones de radio frecuencia (RF) emplean señales con modulaciones complejas con el fin de optimizar el uso del espectro disponible transmitiendo a mayor velocidad con un ancho de banda más estrecho. Estas señales de comunicación combinan envolventes no constantes con altas relaciones pico-medio (*high peak to average ratio*), lo que requiere de amplificadores de potencia lineales. La mayoría de los transmisores emplean amplificadores lineales como por ejemplo los basados en clase A, B o AB que proporcionan una buena linealidad pero un pobre aprovechamiento de la energía, es decir, bajos rendimientos. Por esta razón las nuevas técnicas de amplificación que combinan altos rendimientos con una buena linealidad están teniendo un gran auge en la actualidad, tanto que ya van apareciendo algunos productos comerciales [1].

Entre estas técnicas de linealización de amplificadores de potencia se pueden destacar las técnicas de Eliminación y Restauración de Envolvente (EER) [2] y Envelope Tracking (ET). Estas técnicas se basan en el empleo de amplificadores de alto rendimiento, altamente no lineales, pero son capaces de conseguir niveles de linealidad comparables al de los amplificadores en clase A o clase AB lineales convencionales.

Los amplificadores de alto rendimiento hacen trabajar al transistor en la zona de saturación lo que provoca la baja linealidad. El empleo de clases de amplificación conmutadas como clase D, E o F incrementa el rendimiento de amplificador. El funcionamiento en cada una de estas clases puede ser llevado a cabo mediante el control de las impedancias de carga a los armónicos y a la frecuencia fundamental.

Este paper continúa la línea de investigación seguida en [3] donde se caracterizó un transistor GaN a través del método *load pull* para conocer que cargas ofrecen las condiciones necesarias de funcionamiento en la clase deseada. En esta publicación se presentan las simulaciones y las medidas experimentales realizadas al prototipo del amplificador clase F diseñado a partir de las medidas *load pull* obtenidas.

II. ELIMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE ENVOLVENTE (EER)

La técnica de Eliminación y Restauración de Envolvente fue publicada por Kahn en 1952 [2]. Se trata de una técnica de linealización que puede emplear amplificadores no lineales.

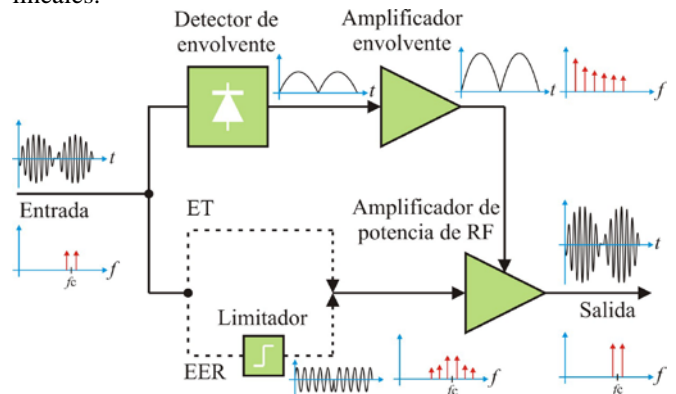


Fig. 1. Esquema de un sistema EER

En un sistema EER (ver Fig. 1) la señal de entrada de radiofrecuencia es descompuesta en información de fase e información de amplitud [3]. De esta manera, se puede realizar la amplificación de potencia de alto rendimiento de los dos tipos de información por separado evitando que se produzca distorsión [3]. Posteriormente, la información de amplitud se encargará de modular la información amplificada de la señal de fase cuyo resultado consiste en restaurar la señal de entrada de radiofrecuencia si ambos tipos de información están correctamente sincronizadas.

III. TOPOLOGÍA CLASE F

La topología clase F es una técnica de amplificación no lineal capaz de conseguir un rendimiento de drenador teórico del 100% [4]. Las condiciones de funcionamiento de esta topología hacen que las formas de onda en el drenador del dispositivo activo se correspondan con una onda cuadrada

para la tensión y media senoide para la corriente. Debido a que las formas de onda de tensión y de corriente no se solapan, se evita la disipación de potencia en la conmutación. La forma de onda cuadrada de tensión sólo contiene frecuencias armónicas impares. Idealmente, debería tener todos los armónicos impares terminados con un circuito abierto en el drenador intrínseco del transistor. La forma de onda de corriente correspondiente con media senoide sólo contiene armónicos pares, y todos los armónicos pares necesitan una terminación de corto circuito para la corriente armónica.

En un amplificador de RF, no es práctico cargar un número infinito de armónicos. Raab ha mostrado que la mayoría de la ganancia en rendimiento debida a la configuración de las formas de onda puede ser realizada solo con unos pocos de los primeros armónicos correctamente terminados [5], [6]. Configurando hasta el 4º armónico, el rendimiento de un amplificador ideal puede ser tan alto como 86%. En la Fig. 2 se pueden observar las formas de onda de un amplificador clase F en el caso ideal (es decir, se cumplen las condiciones para infinitos armónicos) y en el caso de uno con el control de los dos primeros armónicos.

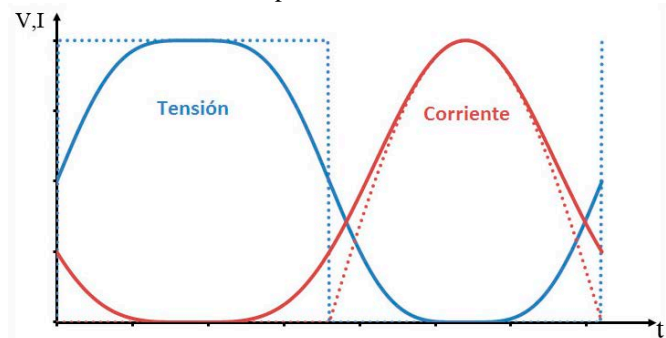


Fig. 2. Formas de onda de drenador de un amplificador clase F: con infinitos armónicos (línea discontinua) y con dos armónicos (línea continua)

En realidad, el rendimiento del amplificador se ve limitado por la capacidad drenador-fuente del transistor, C_{ds} , su resistencia de conducción, R_{on} , la tensión de codo y la disipación de potencia en la red de salida y de alimentación. C_{ds} es difícil de absorber dentro de la red de adaptación multi-armónica sin comprometer la capacidad de cargar a altas frecuencias armónicas. Un dispositivo con una frecuencia de funcionamiento alta comparada con la frecuencia de operación fundamental es conveniente para generar los armónicos de alto orden necesarios para la configuración de las formas de onda. A este respecto, los transistores GaN HEMT son buenos candidatos para la amplificación clase F. Los transistores GaN han demostrado una densidad de potencia significativamente más alta que sus homólogos con GaAs y Si. Como los transistores LDMOS, tienen tensiones de operación altas y consecuentemente impedancias de drenador altas a la frecuencia de funcionamiento.

IV. DISEÑO DEL AMPLIFICADOR CLASE F

En este paper se muestra el diseño de un amplificador clase F a 1.64 GHz empleando el transistor RF3931 de RF Micro Devices basado en tecnología GaN. Con los resultados obtenidos de la realización del método *load pull* y *source pull* realizado al transistor para un punto de polarización concreto [3], se ha procedido al diseño de las redes de entada y de salida.

La simulación del amplificador se ha realizado gracias al programa AWR Microwave Office y al modelo de gran señal del transistor proporcionado por el fabricante. El esquema básico del amplificador clase F propuesto se muestra en la Fig. 3. El fabricante ofrece tanto el modelo del transistor encapsulado como el modelo de la *die* del mismo y los parámetros S del encapsulado. Con estos modelos, junto con el cálculo de la capacidad no lineal drenador-fuente (C_{ds}) y puerta-fuente (C_{gs}), se pueden diseñar las redes de adaptación de entrada y de salida en el drenador intrínseco que cumplan las condiciones necesarias de la clase de amplificación.

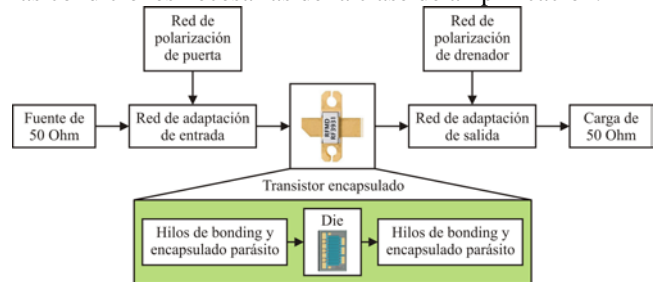


Fig. 3. Diagrama de bloques del amplificador clase F

La red de adaptación de entrada transforma la impedancia de fuente (50 Ohm) a la impedancia de entrada requerida por el transistor a 1.64 GHz. Según [7], el diseño de la red de adaptación de entrada tiene un efecto significativo en la PAE (Power Added Efficiency) del sistema. La capacidad puerta-fuente (C_{gs}) del dispositivo activo junto con el encapsulado parásito limitan establecer impedancias próximas a cortocircuitos a las frecuencias armónicas. Esto se traduce en que la forma de onda de excitación de la puerta será una onda sinusoidal. La red de adaptación de entrada está compuesta por un condensador de desacoplo, una red de adaptación a la frecuencia fundamental y una red de alimentación con por una línea $\lambda/4$ terminada en un condensador resonante a la frecuencia de trabajo.

La red de adaptación de salida se encarga de adaptar a la impedancia de carga (50 Ω) y, además, es capaz de controlar hasta el tercer armónico. En el plano intrínseco del transistor, la impedancia vista por el dispositivo activo al segundo armónico es prácticamente un cortocircuito y la vista al tercer armónico es próxima a un circuito abierto. De esta manera, una onda cuadrada para la tensión y media senoide para la corriente deben ser vistas en el drenador intrínseco del transistor. La red de adaptación de salida se compone de un condensador de desacoplo, una red de adaptación que fija las impedancia a f_0 y a los armónicos en conjunto con una red de alimentación que consta de una línea $\lambda/4$ terminada en un condensador resonante a la frecuencia de trabajo.

Para cumplir las condiciones de operación del amplificador, se establecieron los siguientes objetivos:

1. A f_0 : conseguir la impedancia de fuente y de carga óptimas.
2. A $2f_0$: fijar una impedancia próxima a cortocircuito en el drenador intrínseco del transistor (prácticamente es suficiente con establecer una impedancia que sea $1/3$ de la impedancia de carga a f_0 en el drenador intrínseco [8]).
3. A $3f_0$: fijar una impedancia próxima a un circuito abierto en el drenador intrínseco del dispositivo (prácticamente es suficiente con establecer una impedancia que sea 3 veces la impedancia de carga a f_0 en el drenador intrínseco [8]).

Para comprobar el correcto diseño de las redes de entrada y de salida, se realizó la simulación en frecuencia y en potencia del amplificador para unas condiciones de polarización similares a las de un amplificador en clase B ($V_g = -3,9$ V y $V_{dd} = 48$ V). Las formas de ondas resultantes en el drenador intrínseco del transistor se muestran en la Fig. 4. La forma de onda de corriente representada no se corresponde con la forma de onda en el plano de conmutación del transistor ya que es un plano virtual al que no se puede acceder para su medida.

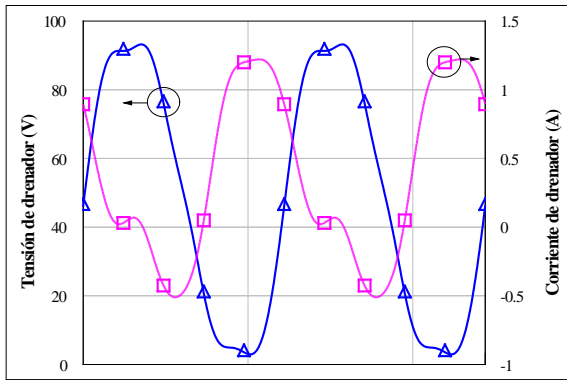


Fig. 4. Formas de onda simuladas en el drenador intrínseco

Los resultados de las simulaciones se muestran en la Fig. 5 y Fig. 6. El rendimiento de drenador máximo del amplificador clase F es aproximadamente de 79,8% con una potencia de salida de 40,05 W en un ancho de banda 250 MHz (para un rendimiento mayor del 60%), siendo la potencia de excitación de 5W.

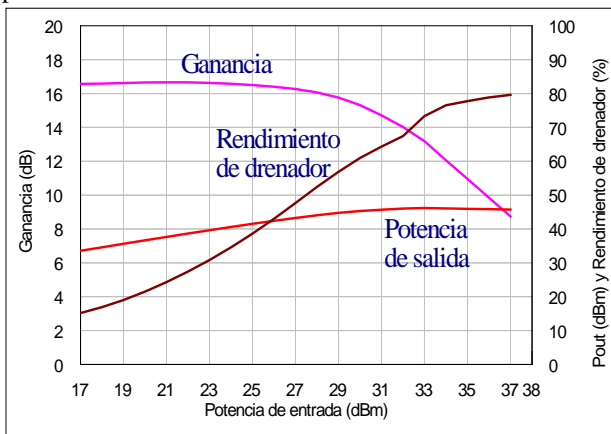


Fig. 5. Resultados simulados en función de la potencia de entrada

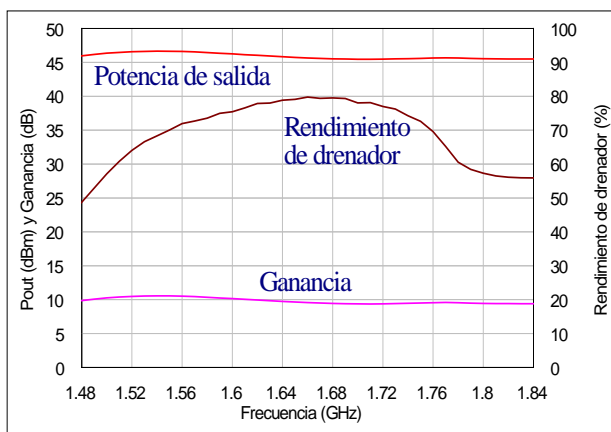


Fig. 6. Resultados simulados en función de la frecuencia

V. IMPLEMENTACIÓN AMPLIFICADOR CLASE F

Finalmente, se procedió a la fabricación del primer prototipo de amplificador sobre un sustrato de Taconic modelo RF35 y una altura de 760 μ m. El transistor GaN se montó directamente sobre un bloque de disipación de aluminio. La Fig. 7 muestra el amplificador clase F fabricado.

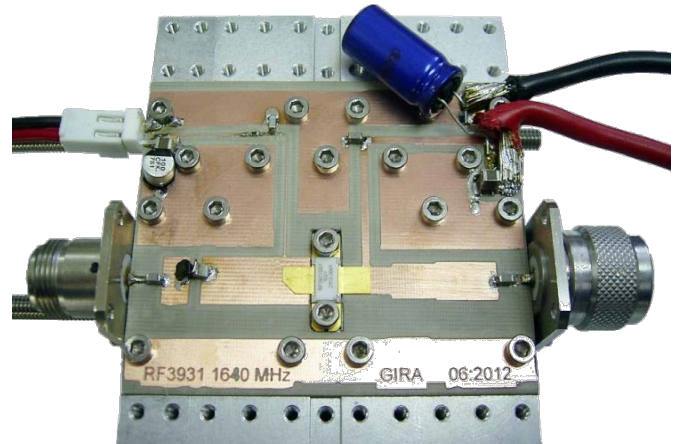


Fig. 7. Prototipo del amplificador clase F

Para realizar las medidas se ha utilizado un banco de medida controlado por ordenador a través de Matlab, que puede verse en la Fig. 8. El banco está compuesto por los siguientes equipos:

1. El generador de señal SM300 de Rohde & Schwarz capaz de trabajar con señales de hasta 3GHz.
2. El driver de excitación ZHL-10W-2G+ de Minicircuits que ofrece hasta 10W de salida en un ancho de banda desde 800MHz a 2GHz.
3. La fuente de alimentación de alta potencia N5767A de Agilent.
4. La carga BW-40N100W de 50 Ω de Minicircuits que soporta hasta 100W.
5. El analizador de redes N5230 de Agilent con el que medir las impedancias de carga.
6. El analizador de espectros N9020A de Agilent para medir la distorsión en la señal de salida.
7. Otros dispositivos como acopladores y fuentes de alimentación.

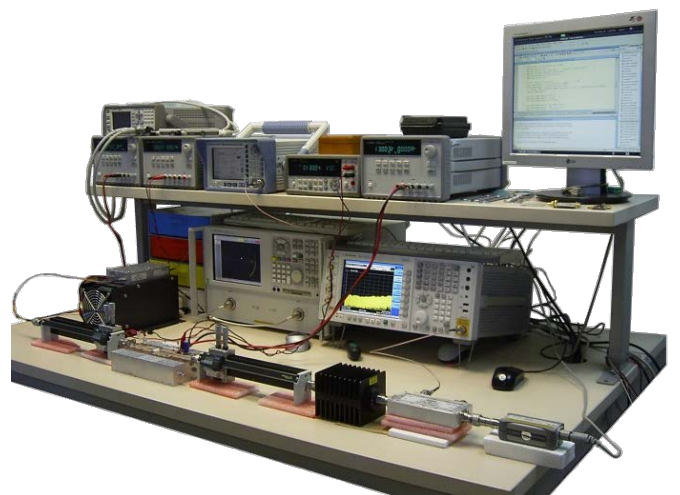


Fig. 8. Banco de medida controlado por ordenador

El programa en Matlab ha sido diseñado por los autores y se encarga de configurar y establecer todos los parámetros necesarios para el funcionamiento del amplificador, como son:

1. Configuración de la comunicación con los equipos.
2. Establecer las tensiones de polarización.
3. Establecer la frecuencia y potencia de excitación.
4. Medir la potencia de RF de salida.
4. Medir la potencia de entrada de DC.
5. Realizar las operaciones necesarias para hallar y representar rendimiento y la potencia de salida.

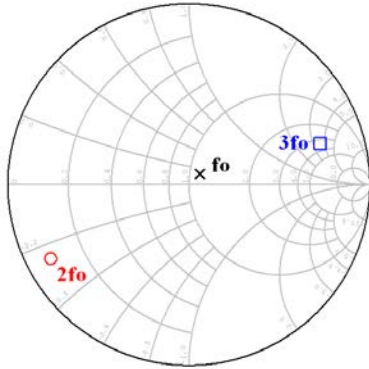


Fig. 9. Impedancias medidas en el drenador intrínseco del transistor

En la Fig. 9 se muestra las impedancias medidas en el plano intrínseco del transistor a la frecuencia fundamental y a los armónicos. La carta de Smith está normalizada a $21,49\Omega$, debido a que se empleó un kit de calibración TRL (Thru, Reflect and Line) tal que la anchura de la pista donde se estableció el plano de referencia se correspondía con una impedancia de $21,49\Omega$ a la frecuencia de trabajo. En ella se observa que los armónicos quedan correctamente configurados para la clase de amplificación diseñada (cortocircuito a $2fo$ y circuito abierto a $3fo$), aunque estas impedancias han sido optimizadas posteriormente. En cuanto a la carga a la frecuencia fundamental, se observa que es prácticamente resistiva como requiere la amplificación en clase F.

Las medidas realizadas al amplificador se muestran en la Fig. 10. Estas medidas han sido originadas con el mismo punto de polarización que se ha utilizado en la simulación de la sección IV, es decir, una $V_g = -3,9V$ y una $V_{dd} = 48V$. El rendimiento de drenador máximo es del 67,3% que se corresponde con una potencia de salida de 39,5 W en un ancho de banda de 280 MHz (medido para un rendimiento de drenador mayor que el 60%). Posteriormente se ha variado el punto de polarización y optimizado manualmente las redes de entrada y de salida con el fin de mejorar las medidas obtenidas. Tras la optimización se consiguió un rendimiento de drenador máximo de 77,8% para una potencia de salida de 39,6W.

VI. CONCLUSIONES

En este paper se ha presentado el diseño e implementación de un amplificador clase F basado en tecnología GaN-HEMT a 1,64 GHz. El transistor RF3931 de RF Micro Devices fue utilizado en el diseño del amplificador, debido a su alta tensión de ruptura principalmente.

Obtenidas las medidas *source pull* y *load pull* del transistor para unas condiciones concretas de polarización, se ha procedido al diseño e implementación de las redes de adaptación capaces de configurar las impedancias necesarias a la frecuencia fundamental y a los armónicos. Las capacidades intrínsecas del transistor y el encapsulado dificultan la habilidad para cargar al transistor con las impedancias requeridas.

Las simulaciones ofrecen un rendimiento de drenador máximo de un 79,8% para una potencia de 40,05W en un ancho de banda de 250 MHz. Las medidas experimentales dan como resultados un rendimiento máximo del 77,8% para una potencia de salida de 39,6W en un ancho de banda de 280 MHz, tras la optimización de este primer prototipo.

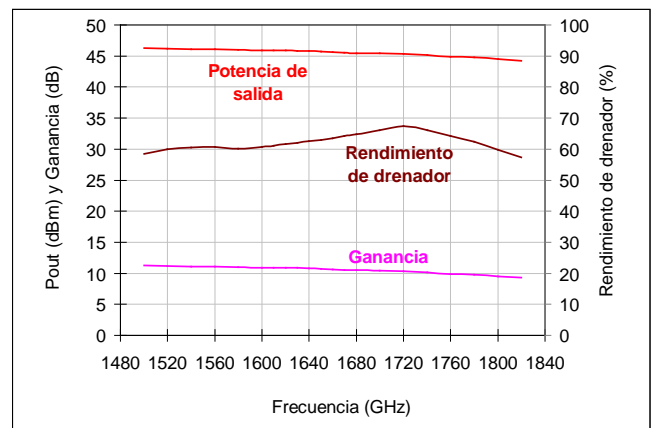


Fig. 10. Potencia de salida, rendimiento de drenador y ganancia en función de la frecuencia

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de los resultados del proyecto de investigación financiado por el MCINN con referencia TEC2009-14307-C02-02.

REFERENCIAS

- [1] Nujira, "Coolteq.I", Nujira Ltd, Building 1010, Cambourne Business Park, Cambourne, Cambridge, CB23 6DP, UK, <http://www.nujira.com> (consultado en Abril de 2012).
- [2] L. R. Kahn, "Single-sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration", *IEEE Proc. of the IRE*, vol. 40, no. 7, Jul 1952.
- [3] D. Tena, M. Patiño, F. J. Ortega, J. M. Pardo, "Amplificador de potencia clase F a 1.64 GHz con control de armónicos", URSI Symposium, Sept. 2011.
- [4] F. Raab, P. Asbeck, S. Cripps, P. Kenington, Z. Popovic, N. Potheary, J. Sevic and N. Sokal, "Power amplifiers and transmitters for RF and microwave," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 3, pp. 814-826, Mar 2002.
- [5] F. Raab, "Class-E, Class-C, and Class-F power amplifiers based upon a finite number of harmonics," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 8, pp. 1462-1468, Aug 2001.
- [6] F. H. Raab, "Maximum efficiency and output of class-F power amplifiers," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, vol. 49, no 6, pp. 1162-1166, Jun 2001.
- [7] D. Schmelzer, S. I. Long, "A GaN HEMT Class F Amplifier at 2 GHz with >80% PAE", *IEEE Journal of Solid-State Circuit*, vol. 42, no. 10, pp. 2130-2136, Oct 2007.
- [8] J. Hoversten, M. Roberg, and Z. Popovic, "Harmonic load pull of high power microwave devices using fundamental-only load pull tuners," *ARFTG Microwave Measurement Symp. Dig.*, Anaheim, CA, USA, pp. 1-4, May 2010.