
CONTENIDO

CAPÍTULO I

Introducción

I.1. Parámetros de ruido y su medida	1
I.2. Objetivos	4
I.3. Organización de la Tesis	6

CAPÍTULO II

Modelos de Ruido de FETs y su Extracción Mediante la Técnica F_{50}

II.1. Introducción	11
II.2. Modelo en pequeña señal de transistores de efecto de campo	12
II.2.1. Elementos parásitos	13
II.2.2. Elementos intrínsecos	16
II.2.3. Extracción de los elementos del circuito equivalente, resultados experimentales	18
II.3. Modelos circuitales de ruido de transistores de efecto de campo	20
II.3.1. Modelo de admitancia	20
II.3.2. Modelo Híbrido	22
II.3.3. Modelo de Pospieszalski o de temperaturas	23
II.4. Extracción de los parámetros de ruido empleando la técnica F_{50}	24
II.4.1. Matriz de correlación total, ensamblado del FET	24
II.4.2. Matriz de correlación intrínseca en función del factor de ruido y redundancia en frecuencia	27
II.5. Extracción de la matriz de correlación intrínseca y parámetros de ruido, utilizando la técnica F_{50}	28
II.5.1. Comprobación de la evolución de la matriz de correlación intrínseca	28
II.5.2. Medida de parámetros de ruido empleando la técnica F_{50}	31
II.6. Conclusiones	34
II.7. Resumen	34

CAPÍTULO III

Sistema y Métodos de Medida de Ruido en Frecuencias de Microondas y Banda Milimétrica (2-75 GHz)

III.1. Introducción	39
III.2. Factor de ruido y temperatura efectiva	40
III.3. Medida del factor de ruido	42
III.3.1. Técnica del ‘Factor Y’	42
III.3.2. Técnica de ‘carga fría’ y de fuente adaptada	43
III.4. Sistema de medida de ruido	45
III.4.1. Características del sistema de medida	47

III.4.2. Medida de potencias con un detector externo a 21.4 MHz	47
III.5. Calibración completa del receptor sin restricciones en la fuente de ruido	50
III.6. Medida del factor de ruido de un dispositivo bajo prueba	53
III.7. Parámetros de ruido del receptor, de 2-40 GHz	54
III.7.1. Parámetros de ruido medidos	55
III.7.2. Factor de ruido de un transistor con puerta común	61
III.8. Sistema de medida de parámetros S y de ruido en la banda Q, 33-50 GHz ...	65
III.9. Sistema de medida de parámetros S y de ruido en la banda V, 50-75 GHz ...	67
III.9.1. Características y calibración del sistema en la banda V	68
III.9.2. Parámetros de ruido medidos del receptor	71
III.9.3. Sistema de medida de parámetros S en oblea en la banda V	72
III.10. Conclusiones	73
III.11. Resumen	74

CAPÍTULO IV

Fuentes de Ruido Coplanares

IV.1. Introducción	78
IV.2. Relación de ruido en exceso	80
IV.3. Medida de temperatura de ruido de fuentes de ruido coplanares	81
IV.4. <i>Cold-FET</i> polarizado en inversa	81
IV.4.1. Circuito equivalente en pequeña señal	82
IV.4.2. Modelo de ruido	83
IV.4.3. Elementos del circuito equivalente y ENR estimado del <i>cold-FET</i> en inversa	88
IV.4.3.1. Elementos del circuito equivalente	88
IV.4.3.2. ENR estimado	90
IV.5. Diodo en avalancha	92
IV.5.1. Modelo en pequeña señal	94
IV.5.1.1. Elementos parásitos	95
IV.5.1.2. Elementos intrínsecos	97
IV.5.2. Modelo de ruido	99
IV.5.3. Extracción del circuito equivalente y ENR estimado del diodo en avalancha	100
IV.5.3.1. Elementos del circuito equivalente	100
IV.5.3.2. ENR estimado	103
IV.6. Calibración del receptor de segunda etapa utilizando una fuente de ruido coplanar	105
IV.7. Conclusiones	109
IV.8. Resumen	110

CAPÍTULO V

Modelo Distribuido en Pequeña Señal y de Ruido de Transistores de Efecto de Campo

V.1. Introducción	115
V.2. Modelo distribuido en pequeña señal	117
V.2.1. Matriz ABCD de una sección elemental del FET	117
V.2.2. Escalado de los elementos concentrados del FET	121

V.2.3. Ensamblado de circuito equivalente distribuido	122
V.2.4. Elementos parásitos del PAD	125
V.3. Modelo distribuido de ruido	126
V.3.1. Ensamblado	126
V.3.2. Desensamblado	131
V.3.3. Aplicando F_{50} al modelo distribuido	133
V.4. Parámetros S estimados con el modelo distribuido	134
V.5. Extracción de los parámetros de ruido de un FET	138
V.5.1. Matriz de correlación intrínseca y parámetros de ruido en función del número de celdas unitarias, N	138
V.6. Modelo distribuido de ruido, aplicando el modelo de temperaturas de ruido o de Pospieszalski a las fuentes de ruido del FET intrínseco	148
V.7. Conclusiones	152
V.8. Resumen	152

CAPÍTULO VI

Circuito Equivalente y Parámetros de Ruido de un HBT Aplicando la Técnica F_{50}

VI.1. Introducción	158
VI.2. Modelo en pequeña señal del HBT	159
VI.2.1. Elementos parásitos	160
VI.2.2. Elementos intrínsecos	164
VI.3. Modelo de ruido	166
VI.4. Aplicando la técnica F_{50}	169
VI.5. Extracción de los elementos del circuito equivalente y parámetros de ruido	171
VI.6. Conclusiones	175
VI.7. Resumen	176

CAPÍTULO VII

Conclusiones y Líneas Futuras

VII.1. Introducción	179
VII.2. Conclusiones generales	179
VII.3. Contribuciones de esta Tesis	182
VII.4. Líneas futuras	182

ANEXO A

Bipuertos ruidosos

A.1. Representación de bipuertos ruidosos	184
A.2. Matrices de correlación de bipuertos ruidosos	187
A.3. Matrices de paso e interconexión de bipuertos	187
A.4. Matrices de correlación de bipuertos pasivos y activos	189

ANEXO B

Características de los elementos del sistema de medida de ruido

B.1. Características generales	191
B.2. Factor de ruido y ganancia de los amplificadores de bajo ruido y convertidores de bajada	192
B.2.1. LNA-MITEQ (0.1-26.5GHz), AFS44-00102650-40-10P-44	193
B.2.2. LNB-MITEQ (26-42GHz), LNB 2642-50	193
B.2.3. LNA-MITEQ (30-50GHz), JSW4-30005000-45-0A	193
B.2.4. Down-Converter-MILLITECH (33-50GHz), CDA-22-RC066A	194
B.2.5. LNA- SPACEK LABS (50-75 GHz), SLV-20-4W	195
B.2.6. Down-Converter-MILLITECH (50-75 GHz), CDA-15-RC545B	195
B.3. Requerimientos de alimentación y control	195

ANEXO C

Detector a 21.4 MHz

C.1. Características generales	197
C.2. Circuito esquemático y layout del detector	199
C.3. Curva de transferencia del detector	200

ANEXO D

Caracterización de una transición de guía de onda coplanar a microstrip

D.1. Introducción	202
D.2. Caracterización de la transición CPW-M	202
D.3. Simulación electromagnética	205
D.4. Parámetros S estimados de la transición	206

ANEXO E

Modelo de los electrodos de un FET

E.1. Capacidades e inductancias distribuidas de los electrodos	210
E.2. Resistencias e inductancias propias de los electrodos	212

ANEXO F

<i>Matriz de capacidades de los electrodos del FET</i>	215
---	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1	Factor de ruido en función del coeficiente de reflexión de entrada, Γ_S	2
Figura II.1	Circuito eléctrico equivalente del FET	13
Figura II.2	Circuito equivalente del FET polarizado en <i>pinch-off</i>	13
Figura II.3	Transistor polarizado en directa, con $V_{ds}=0$ V	14
Figura II.4	Funciones α y α_g para la configuración drenador conectado a masa (- - y ___) y con drenador en circuito abierto o flotante (-x- y -o-) en función de la corriente normalizada i , con $I_T=nV_T/R_{ch}$	15
Figura II.5	Diagrama esquemático del FET con a) Drenador flotante, y b) drenador y fuente a masa	15
Figura II.6	Parte real de Z_{11} , cuando el drenador está a masa, en función de $1/I_g$	15
Figura II.7	Desensamblado del FET, para obtener la matriz de admitancias del circuito intrínseco	17
Figura II.8	Parámetros S medidos y estimados utilizando valores iniciales de los elementos intrínsecos (expresiones (II.6)-(II.13)) y optimizados de: (a) un PHEMT tsc4x15 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=9.12$ mA, (b) y un HEMT x350 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=21.4$ mA	18
Figura II.9	Modelo de ruido del FET intrínseco en configuración de admitancia, con dos fuentes de corriente de ruido: una debida a la puerta y otra al drenador	21
Figura II.10	Circuito equivalente del FET intrínseco, con una fuente de tensión de ruido de puerta y fuente de corriente de ruido de drenador	22
Figura II.11	Circuito equivalente del FET en bloques, incluyendo las fuentes de ruido intrínsecas en configuración híbrida	25
Figura II.12	Diagrama en bloques del ensamblado de la matriz de correlación total del FET	25
Figura II.13	Elementos de la matriz de correlación intrínseca y el factor de correlación $\rho = C_{12} / (C_{11} \cdot C_{22})^{1/2}$, considerando la configuración de admitancia, de un PHEMT de Philips, tsc4x15	29
Figura II.14	Elementos de la matriz de correlación intrínseca y el factor de correlación $\rho = C_{12} / (C_{11} \cdot C_{22})^{1/2}$, considerando la configuración híbrida, de un PHEMT de Philips, tsc4x15	30
Figura II.15	Temperatura de puerta y drenador, modelo de Pospieszalski, de un PHEMT de Philips, tsc4x15	30
Figura II.16	Matriz de correlación intrínseca estimada con la técnica F_{50} , de un transistor tsc4x15 , con $V_{ds}=1.5$ V e $I_{ds}=9.12$ mA	31
Figura II.17	Parámetros de ruido calculados con la técnica F_{50} de un transistor tsc4x15 , con $V_{ds}=1.5$ V e $I_{ds}=9.12$ mA	32

Figura II.18	Factor de ruido del transistor, F_{TRT} , medido y estimado con la técnica F_{50} de un transistor <i>tsc4x15</i> , con $V_{ds}=1.5$ V e $I_{ds}=9.12$ mA	32
Figura II.19	Parámetros de ruido calculados con la técnica F_{50} y con método basado en medidas de <i>tuner</i> , de un transistor <i>x350</i> , con $V_{ds}=1.5$ V e $I_{ds}=26$ mA	33
Figura II.20	Factor de ruido del transistor, F_{TRT} , medido y estimado con la técnica F_{50} y con un método basado en medidas de <i>tuner</i> , de un transistor <i>x350</i> , con $V_{ds}=1.5$ V e $I_{ds}=26$ mA	33
Figura III.1	Representación gráfica de la potencia de ruido a la salida de un DUT, en función de la temperatura de ruido de una impedancia de fuente conectada a la entrada	41
Figura III.2	Representación gráfica de la temperatura efectiva, T_e , de un DUT	42
Figura III.3	Diagrama a bloques de un sistema de medida empleando la técnica de carga fría	44
Figura III.4	Diagrama a bloques de un sistema de medida de ruido	46
Figura III.5	Sistema de medida de ruido en oblea de 2-22 GHz y de 26-40 GHz...	46
Figura III.6	Diagrama a bloques del detector a 21.4 MHz, con un filtro paso bajo a la entrada	48
Figura III.7	Sistema de medida para obtener la curva de transferencia del detector a 21.4 MHz	48
Figura III.8	Curva de transferencia del detector a 21.4 MHz	49
Figura III.9	Desviación estándar de la curva de transferencia	49
Figura III.10	Curva de transferencia medida para dos frecuencias centrales del AE: 1 y 2 GHz	50
Figura III.11	Receptor libre de ruido con una onda de ruido a la entrada, b_{N1} y otra a la salida b_{N2}	50
Figura III.12	Esquema de medida empleado para calibrar el receptor	52
Figura III.13	Esquema de medida del factor de ruido del DUT	53
Figura III.14	Parámetros de ruido del receptor de 2-22 GHz calculados con <i>tuner</i> y aproximaciones	55
Figura III.15	Factor de ruido un DUT (F_{DUT}) $\pm \Delta F_{DUT}$, debida a la desviación entre los parámetros de ruido del receptor calculados con aproximaciones y <i>tuner</i> (ver Figura III.14)	56
Figura III.16	Parámetros de ruido de un DUT calculados con la técnica F_{50} . F_{DUT} se ha simulado utilizando los valores medios entre de los parámetros de ruido del receptor (F_{REC}) calculados con <i>tuner</i> y aproximaciones y considerando la diferencia entre estos: $F_{REC} + \Delta F_{REC}$ y $F_{REC} - \Delta F_{REC}$	57
Figura III.17	Valores medios y desviación estándar de los parámetros de ruido del receptor de: (a) 2-22 GHz y (b) 26-40 GHz, calculados con aproximaciones	58

Figura III.18	Factor de ruido un DUT ($F_{DUT} \pm \Delta F_{DUT}$), en función de la desviación estándar en la medida de los parámetros de ruido del receptor	59
Figura III.19	Parámetros de ruido del DUT, calculados con la técnica F_{50} , en función de la desviación estándar en la medida de los parámetros de ruido del receptor mostrados en la Figura III.18	59
Figura III.20	Parámetros de ruido del receptor para la banda (a) de 2-22 GHz y (b) de 26-40 GHz, utilizando lecturas de potencia de la traza del AE y con un detector externo	60
Figura III.21	Constante de ganancia de los receptores de 2-22 GHz y de 26-40 GHz	61
Figura III.22	Layout de un PHEMT con puerta común	62
Figura III.23	Factor de ruido y ganancia disponible de un FET pasivo con puerta común	63
Figura III.24	Incertidumbre de F_{DUT} , ΔNF_{DUT} , en función del F_{DUT} y G_a , ambas en dB, tomadas de [25]	64
Figura III.25	Primera propuesta del sistema de medida de ruido en oblea en la banda Q, de 33-50 GHz, como una extensión del sistema de 2-40 GHz	65
Figura III.26	Sistema de medida de ruido en oblea de 33-50 GHz, banda Q	66
Figura III.27	Parámetros de ruido del receptor en la banda Q, 33-50 GHz, del sistema mostrado en la Figura III.25	67
Figura III.28	Factor de ruido del receptor en la banda Q, 33-50 GHz, después de optimizar las pérdidas inducidas por los elementos del sistema	67
Figura III.29	Esquema del sistema de medida de ruido y parámetros S en guía de onda en la banda V	69
Figura III.30	Fotografía del sistema de medida en la banda V	70
Figura III.31	Parámetros de ruido del receptor en la banda V	71
Figura III.32	Factor de ruido (-◇-) y pérdidas (-□-) de un atenuador variable en dos puntos de atenuación (0.5 dB y 2 dB), medidos con el sistema de medida de ruido en la banda V	71
Figura III.33	Parámetros S medidos del estándar 'thru' del substrato de calibración de Picoprobe	72
Figura III.34	Parámetros S medidos de una línea de 550 μm de longitud	73
Figura IV.1	Sistema de medida de transistores en oblea, utilizando una fuente de ruido coaxial. Esquema de conexión de (a) un <i>cold-FET</i> , (b) de un diodo en avalancha conectado a una transición coplanar-microstrip, (c) de una carga de referencia de 50 Ω y (d) de un dispositivo bajo prueba (DUT)	79
Figura IV.2	Circuito equivalente en pequeña señal del <i>cold-FET</i> polarizado en inversa	82
Figura IV.3	Modelo de ruido del <i>cold-FET</i> polarizado en inversa	84

Figura IV.4	Diagrama del <i>cold-FET</i> polarizado en inversa, representado como un bipuerto ruidoso en su configuración de admitancia, con una admitancia Y_S conectada entre drenador y fuente con una fuente de ruido i_s asociada. Se indican los planos de contacto del sistema de medida de ruido: 1-1' y 2-2'	86
Figura IV.5	Parámetros S medidos (-) y estimados (o) del <i>cold-FET</i> con la puerta polarizada en inversa	89
Figura IV.6	Factor multiplicativo M^2 , medido (- -) e interpolado (-), de un <i>cold-FET</i> polarizado en inversa	90
Figura IV.7	Temperatura de ruido, medida (- -) y estimada (-), de un <i>cold-FET</i> polarizado en inversa	91
Figura IV.8	Relación de ruido en exceso, ENR, medida (- -) y estimada (-) de un <i>cold-FET</i> polarizado en inversa	91
Figura IV.9	Diodo en avalancha conectado a una transición coplanar-microstrip ..	92
Figura IV.10	Coefficiente de reflexión del diodo medido en el plano coplanar 2-2', Γ_d^{ND} , y a la entrada del diodo, plano 3-3', Γ_d^{ND} ,	93
Figura IV.11	Temperatura de ruido del diodo medida en el plano coplanar 2-2', T_d^{ND} y a la entrada del diodo, plano 3-3', T_d^{ND} ,	93
Figura IV.12	(a) Unión p-n polarizada en inversa (condiciones de avalancha). (b) Modelo del diodo en avalancha	94
Figura IV.13	Circuito equivalente de un diodo en avalancha propuesto en [39]	94
Figura IV.14	Circuito equivalente del diodo en avalancha, incluyendo los elementos parásitos	95
Figura IV.15	Circuito equivalente del diodo polarizado: (a) en directa, (b) en <i>pinch-off</i>	96
Figura IV.16	(a) Curva de $\text{Re}(Z_{eq_f})$ versus $1/I_d$. (b) Curva de $\text{Im}(Y_{eq_p})$ versus xx , donde $xx = 1/\sqrt{1-V_d/V_{bi}}$	96
Figura IV.17	Impedancia intrínseca del diodo en avalancha en función de la frecuencia angular, ω	98
Figura IV.18	Circuito equivalente del diodo incluyendo la fuente de ruido intrínseca, i_a	99
Figura IV.19	Parte real de la impedancia, medida (-o-) e interpolada (-), del diodo polarizado en directa, (a) en función de la frecuencia, (b) en función de $1/I_d$	100
Figura IV.20	Parte imaginaria de la impedancia, medida (-o-) e interpolada (-), del diodo polarizado en directa, $V_d = 1.0$ V e $I_d = 17$ mA	101
Figura IV.21	Parte imaginaria de la admitancia medida del diodo polarizado en <i>pinch-off</i> , (a) en función de la frecuencia, (b) en función de $1/\sqrt{1-V_d/V_{bi}}$	101
Figura IV.22	(a) Impedancia en el plano intrínseco, Z_i , medida y estimada. (b) Impedancia total medida y estimada del diodo en avalancha, para el punto de polarización $V_d = -10.4$ V e $I_d = 16.7$ mA	102

Figura IV.23	Coeficiente de reflexión, Γ_d^{ND} , medido y estimado del diodo	102
Figura IV.24	Factor multiplicativo M^2 , medido (- -) e interpolado (-), del diodo en avalancha	104
Figura IV.25	Temperatura de ruido, medida (- -) y estimada (-), del diodo en avalancha	104
Figura IV.26	Relación de ruido en exceso, ENR, medida (- -) y estimada (-), del diodo en avalancha	105
Figura IV.27	Parámetros de ruido del receptor medidos con una fuente de ruido coaxial (o), con el <i>cold-FET</i> (-□-) y con el diodo en avalancha (-Δ-)..	107
Figura IV.28	KG ₀ B del receptor del sistema de medida de ruido, medida con una fuente de ruido coaxial (o), con el <i>cold-FET</i> (-□-) y con el diodo en avalancha (-Δ-)	107
Figura IV.29	Factor de ruido de un PHEMT, <i>tscx415</i> con $V_{ds}=1.5$ V e $I_{ds}=18$ mA, medido con una fuente de ruido coaxial (o), con el <i>cold-FET</i> (-□-) y con el diodo en avalancha (-Δ-)	108
Figura IV.30	Parámetros de ruido de un PHEMT, <i>tsc4x15</i> , con $V_{ds}=1.5$ V e $I_{ds}=18$ mA	109
Figura V.1	Modelo del FET para un ancho de W_u'	117
Figura V.2	Esquema del FET, dividido en la impedancia de los electrodos, Z, y la admitancia de la parte activa del transistor y capacidades de los electrodos, Y	117
Figura V.3	Interconexión en cascada entre cada sección elemental del FET	118
Figura V.4	Esquema de una sección elemental del FET, para su análisis en configuración de cascada	119
Figura V.5	Elementos de la matriz de admitancia Y^T	120
Figura V.6	Dimensiones de los electrodos del FET	121
Figura V.7	Modelo del FET incluyendo elementos parásitos del PAD	123
Figura V.8	Estructura de un FET de 2 dedos	124
Figura V.9	Modelo del FET incluyendo elementos parásitos del PAD	125
Figura V.10	Circuito equivalente, para un bloque de ancho W_u' , incluyendo las fuentes de ruido intrínsecas y térmicas	127
Figura V.11	Modelo del FET incluyendo fuentes de ruido y elementos parásitos de los PADS	131
Figura V.12	Dimensiones de los electrodos y del sustrato del FET	135
Figura V.13	Parámetros S medidos y estimados utilizando un modelo concentrado y distribuido de los FETs: (a) <i>tsc4x15</i> con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=17.4$ mA; (b) <i>tsc4x50</i> con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=3.25$ mA; (c) <i>x350</i> con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=38.37$ mA; (d) <i>x375</i> con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=11.28$ mA	138
Figura V.14	Parámetros de ruido estimados aplicando la técnica F_{50} al modelo distribuido de ruido del FET: (a) <i>tsc4x15</i> con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=17.4$ mA; y (b) <i>x350</i> con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=38.37$ mA	140

Figura V.15	Matriz de correlación intrínseca de una sección elemental del FET: (a) tsc4x15 con $V_{ds}=1.5V$, $I_{ds}=17.4$ mA; y (b) x350 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=38.37$ mA	141
Figura V.16	Factor de correlación entre las fuentes de ruido intrínsecas de una sección elemental del FET: (a) tsc4x15 con $V_{ds}=1.5V$, $I_{ds}=17.4mA$; y (b) x350 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=38.37$ mA	142
Figura V.17	Matriz de correlación total del FET: (a) tsc4x15 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=17.4$ mA; y (b) x350 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=38.37$ mA	143
Figura V.18	Factor de ruido medido y estimado FET: (a) tsc4x15 con $V_{ds}=1.5V$, $I_{ds}=17.4$ mA; y (b) x350 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=38.37$ mA	144
Figura V.19	Matriz de correlación intrínseca de un PHEMT, tsc4x15 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=18$ mA; aplicando la técnica F_{50} al modelo distribuido y utilizando una calibración de receptor con fuente de ruido coaxial y con un cold-FET y un diodo en avalancha como fuentes de ruido coplanares	145
Figura V.20	Parámetros de ruido extraídos de un PHEMT, tsc4x15 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=18$ mA; aplicando la técnica F_{50} al modelo distribuido y utilizando una calibración de receptor con fuente de ruido coaxial y con un cold-FET y un diodo en avalancha como fuentes de ruido coplanares	146
Figura V.21	Parámetros de ruido extraídos aplicando la técnica F_{50} a un modelo concentrado y al modelo distribuido, de un PHEMT, tsc4x15 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=18$ mA; utilizando la calibración de receptor con el diodo en avalancha	146
Figura V.22	Parámetros de ruido estimados con el modelo distribuido y con un método basado en medidas de tuner, de un transistor x350 , con $V_{ds}=1.5$ V e $I_{ds}=26$ mA	147
Figura V.23	Factor de ruido del transistor, F_{TRT} , medido y estimado a partir de los resultados del modelo distribuido y con un método basado en medidas con tuner, de un transistor x350 , con $V_{ds}=1.5$ V e $I_{ds}=26$ mA	147
Figura V.24	Elementos de C^{int} , de una sección elemental, estimados aplicando a las fuentes de ruido intrínsecas el modelo híbrido, el modelo de temperaturas e interpolando los resultados de este último, para los FETs: (a) tsc4x15 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=17.4$ mA; y (b) x350 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=38.37$ mA	149
Figura V.25	Parámetros de ruido, estimados aplicando a las fuentes de ruido intrínsecas el modelo híbrido, el modelo de temperaturas e interpolando los resultados de este último, para los FETs: (a) tsc4x15 con $V_{ds}=1.5V$, $I_{ds}=17.4$ mA; y (b) x350 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=38.37$ mA	150

Figura V.26	Factor de ruido, F_{TRT} , medido y estimado aplicando a las fuentes de ruido intrínsecas el modelo híbrido, el modelo de temperaturas e interpolando los resultados de este último, para los FETs: (a) tsc4x15 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=17.4$ mA; y (b) x350 con $V_{ds}=1.5$ V, $I_{ds}=38.37$ mA	151
Figura VI.1	Circuito equivalente en pequeña señal, en configuración T, de un HBT	159
Figura VI.2	Circuito equivalente para $V_{be}<0$ y $V_{ce}=0$ V	160
Figura VI.3	Parte imaginaria de los parámetros Y del HBT para $V_{be}<0$ V y $V_{ce}=0$ V	161
Figura VI.4	Capacidades equivalentes del HBT en función de $1/\sqrt{1-V_{be}/V_{bi}}$	161
Figura VI.5	Parte imaginaria de los parámetros Z del HBT cuando está polarizado en directa	162
Figura VI.6	Parte real de los parámetros Z del HBT cuando está polarizado en directa	163
Figura VI.7	Parte real de los parámetros Z del HBT en función de $1/I_{be}$	163
Figura VI.8	Circuito equivalente de ruido propuesto por Hawkins, [13], para un transistor bipolar	166
Figura VI.9	Circuito equivalente del HBT, incluyendo las fuentes de ruido	167
Figura VI.10	Ensamblado de las fuentes de ruido del HBT	168
Figura VI.11	Diagrama de flujo del algoritmo utilizado para extraer los elementos del circuito equivalente y los parámetros de ruido de un HBT	172
Figura VI.12	Parámetros S, de un HBT-8240 , medidos (o) y estimados minimizando e_S (---) y e_T (-+-)	173
Figura VI.13	Factor de ruido, de un HBT-8240 , medido (o), estimado minimizando e_S (---) y e_T (-+-) y estimado con la técnica F_{50} (- Δ -) ..	174
Figura VI.14	Parámetros de ruido, de un HBT-8240 , medidos utilizando una técnica basada en tuner (o), estimados a partir de los elementos del circuito equivalente resultantes al minimizar e_S (---) y e_T (-+-) y estimados con la técnica F_{50} (- Δ -)	174
Figura A.1	Bipuerto libre de ruido con dos fuentes equivalentes de corriente de ruido, configuración π	184
Figura A.2	Bipuerto libre de ruido con dos fuentes equivalentes de tensión de ruido, configuración T	185
Figura A.3	Bipuerto libre de ruido con una fuente equivalente de tensión y una de corriente de ruido, configuración en cascada ó ABCD	186
Figura A.4	Interconexión entre Bipuertos: (a) en serie, (b) en paralelo y (c) en cascada	188
Figura B.1	Factor de ruido y ganancia del LNA de MITEQ de 0.1 a 26.5 GHz ..	193
Figura B.2	Factor de ruido y ganancia del LNB de MITEQ de 2-42 GHz	193

Figura B.3	Factor de ruido y ganancia del LNA de MITEQ de 30-50 GHz	193
Figura B.4	Parámetros S del LNA de MITEQ de 30-50 GHz	194
Figura B.5	Factor de ruido y ganancia de conversión del Down-Converter de Millitech de 30-50 GHz	194
Figura B.6	Factor de ruido y ganancia del LNA de Spacek de 50-75 GHz	195
Figura B.7	Factor de ruido y pérdidas de conversión del Down-Converter de Millitech de 50-75 GHz	195
Figura C.1	Esquema del detector a 21.4 MHz, incluyendo a la entrada un filtro bajo a 30 MHz	197
Figura C.2	Esquemático del filtro paso-bajo	198
Figura C.3	Amplificador operacional en configuración no inversora, conectado a la salida del detector	198
Figura C.4	Circuito esquemático del detector a 21.4 MHz	199
Figura C.5	Layout del detector a 21.4 MHz	199
Figura C.6	Montaje utilizado para caracterizar la curva de transferencia del detector	200
Figura C.7	Curva de transferencia del detector	200
Figura D.1	(a) Estructura de la línea de transmisión microstrip con transiciones CPW-M. (b) Análisis en modo par y (c) análisis en modo impar	203
Figura D.2	(a) Layout utilizado para simular la transición CPW-M, (b) dimensiones de la transición	206
Figura D.3	Parte real (--) e imaginaria (-.-) de la impedancia, Z, calculada de las líneas microstrip	206
Figura D.4	Parámetros S de la transición, calculados con el método propuesto (-o-) y simulados con MOMENTUM (-)	207
Figura D.5	Parámetros S de la línea de longitud $\ell=0$, calculados con el método propuesto (-o-), simulados con MOMENTUM (-.-) y medidos (-)	208
Figura E.1	Circuito equivalente de la impedancia de los electrodos de un FET ..	210
Figura E.2	Excitación de los modos acoplados del FET, descompuesto en modo par e impar que equivale a una guía de onda coplanar (CPW) y línea coplanar (CPS), respectivamente	211
Figura E.3	Dimensiones de la (a) Guía de onda coplanar y (b) línea coplanar, de acuerdo a la estructura del FET	212
Figura E.4	Dimensiones de los electrodos y del sustrato del FET	213
Figura F.1	Circuito equivalente de las capacidades de línea	215

LISTA DE TABLAS

Tabla II.1	Elementos de circuito equivalente de un PHEMT <i>tsc4x15</i> y un HEMT <i>x350</i>	19
Tabla III.1	Error cuadrático medio entre el factor de ruido medido y estimado ...	63
Tabla IV.1	Elementos del circuito equivalente del <i>cold-FET</i> en inversa	89
Tabla IV.2	Elementos parásitos del circuito equivalente del diodo en avalancha	102
Tabla IV.3	Elementos intrínsecos del circuito equivalente del diodo en avalancha	102
Tabla V.1	Características y dimensiones de los electrodos y sustrato del FET ...	135
Tabla V.2	Elementos del circuito equivalente de los electrodos del FET	135
Tabla V.3	Elementos parásitos e intrínsecos del circuito equivalente del FET calculados con el modelo concentrado y optimizados para ajustar el modelo distribuido	136
Tabla V.4	Elementos del circuito equivalente del FET, utilizando el modelo distribuido	137
Tabla VI.1	Elementos del circuito equivalente en pequeña señal de un <i>HBT-8240</i>	175
Tabla A.1	Matrices de paso, P , para transformar la representación de una matriz de correlación a otra	188
Tabla B.1	Características de los componentes del sistema de medida de ruido ..	191
Tabla B.2	Requerimientos de alimentación	195
Tabla B.3	Requisitos de bits de control	196
Tabla C.1	Valores de los elementos del filtro paso-bajo	198
Tabla C.2	Especificaciones del analizador de espectros y del multímetro para medir la curva de transferencia del detector	201
Tabla E.1	Dimensiones de a y b para las estructuras CPW y CPS	212

RESUMEN

En esta Tesis se utiliza una técnica de fuente adaptada para medir los parámetros de ruido de transistores de efecto campo, como MESFET y HEMT. Para ello, se ha implementado un sistema de medida en el margen de frecuencias de 2-75 GHz, de 2-50 GHz para medidas de dispositivos en oblea y de 50-75 GHz en guía de onda. Sin embargo, en este margen de frecuencias las pérdidas de los dispositivos aumentan, el nivel del ENR de la fuente de ruido, utilizada para calibrar el sistema, es menor y la sensibilidad a la precisión en la medida de potencia es mayor.

Para disminuir la incertidumbre en la medida de potencia, se ha implementado el uso de un detector externo a un analizador de espectros, utilizado inicialmente como medidor de potencia. La calibración del receptor del sistema de medida de ruido se realiza mediante expresiones aproximadas, las cuales son extendidas a un caso general. Dicha calibración requiere como datos la lectura de potencias de ruido para dos cargas, conectadas a la entrada del receptor, a diferente temperatura y de su correspondiente coeficiente de reflexión, el cual no tiene que ser necesariamente igual entre cargas. Particularmente, para reducir la incertidumbre en el cálculo de la constante de ganancia del receptor y como una alternativa a las fuentes de ruido coaxiales, se proponen dos fuentes de ruido en oblea (del tipo coplanar): un transistor polarizado en frío (*cold-FET*) y un diodo en avalancha, que generan un nivel de ENR mayor en el plano de las sondas de prueba y que además, siendo coplanares permiten disminuir pérdidas debidas al uso de una transición coaxial-coplanar.

Por otra parte, se propone un modelo distribuido para transistores de efecto de campo con la finalidad de predecir mejor el comportamiento en pequeña señal y ruido del dispositivo teniendo en cuenta los efectos distribuido de las líneas (electrodos) de puerta, drenador y fuente.

También se utiliza la técnica F_{50} , en conjunto con un modelo en pequeña señal y de ruido clásico para transistores bipolares, para extraer simultáneamente los elementos del circuito equivalente en pequeña señal y los parámetros de ruido de un transistor bipolar de heterounión (HBT).

ABSTRACT

In this Thesis a matched source technique is used to measure the noise parameters of field effect transistors, such as MESFET and HEMT. A noise measurement system, from 2 to 75 GHz, has been implemented. In the frequency range of 2-50 GHz the system has been implemented to measure on-wafer devices, and in the frequency range of 50-75 GHz it has been implemented to measure waveguide devices. However, at these frequencies the losses of the devices increase, the ENR level of the noise source, which is employed to calibrate the receiver, decrease, and the sensibility to the power uncertainty is bigger.

To reduce the measurement uncertainty of the noise power, an external detector to a spectrum analyzer, which at the beginning was employed as power meter, has been implemented. Approximate expressions to calibrate the receiver are used, where these are extended to a general case. To develop the calibration the measure of the noise power of two connected loads to the input receiver, and of its corresponding coefficient reflection, it is required. There is not restriction between the loads reflection coefficients. To reduce the uncertainty in the determination of the receiver's gain constant, and as an alternative to the coaxial noise sources, two on-wafer noise sources, a *cold-FET* and an avalanche noise diode, have been proposed. The on-wafer noise sources generate a bigger ENR level at the on-wafer reference plane, and furthermore, the due losses to the coaxial-to-on-wafer-transition can be practically eliminated.

Otherwise, a FET distributed noise model, which takes into account the propagation effects along the device electrodes, is proposed with the purpose of predicting better the small-signal and noise performance of the device.

As an application of F_{50} method, this is applied, in combination of a small-signal and a classic bipolar noise model, to simultaneously extract the elements of the small-signal equivalent circuit and the noise parameters of a heterounion bipolar transistor (HBT).