

SiC MESFET非线性模型及其嵌入研究

徐跃杭, 国云川, 徐锐敏, 延波, 吴韵秋

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】基于TOM直流I-V模型和Angelov非线性电容模型, 该文建立了适合SiC MESFET的非线性模型, 并利用符号定义器件(SDD)实现了在安捷伦ADS软件中嵌入, 最终建立了SiC MESFET工艺模型库。该非线性模型考虑了击穿特性、色散效应和自热效应等, 可进行直流、散射S参数和谐波平衡等ADS软件中的仿真器。该模型在国内SiC MESFET工艺线上的验证结果表明模型具有较好的精度。

关键词 金属半导体场效应晶体管; 非线性模型; 碳化硅; 符号定义器件

中图分类号 TN304.2

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.03.026

Modeling and Embedding of SiC MESFET Nonlinear Model

XU Yue-hang, GUO Yun-chuan, XU Rui-min, YAN Bo, and WU Yun-qiu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The SiC MESFETs nonlinear characteristic is modeled by modified Triquint's own model (TOM) DC I-V model and Angelov nonlinear capacitor models. The nonlinear model has been implemented in Agilent advanced design system (ADS) by using symbolic defined devices (SDD), and an integral SiC MESFET process line design kit has been embedding in ADS. Its validity is verified by measured DC I-V curves, multi-bias S parameters and harmonic balance simulation based on native SiC MESFET process line, and good accuracy has been achieved.

Key words MESFET; nonlinear model; SiC; symbolic defined devices

近年来, 继Si和GaAs之后, 宽带隙半导体材料SiC以其高击穿电压、高热导率和高饱和电子迁移率, 在高温、高功率微波器件的应用中倍受青睐^[1]。目前, SiC MESFET的输出功率已达8 W/mm, 漏极效率达70%^[2], 栅漏击穿电压大于125 V^[3], 并在S波段有相关产品^[4]。由于有源器件的建模对器件的工艺和电路设计有着指导作用, 因此, SiC MESFET器件在无线通信领域的快速发展也推动了SiC MESFET器件的模型研究^[5-6]。

自1980年Curtice建立第一个经验模型以来, GaAs FET非线性建模的发展非常迅速, TOM、Curtice Cubic、Angelov和EESOF等模型^[7-9]已被广泛应用于器件和电路设计。但SiC材料和GaAs材料之间存在很大差异, 如速度-电场关系不同; 饱和电子迁移率和热导率高; 常温下杂质不完全离化, 即“冻析效应”等。因此, 必须对这些模型进行修正和改进, 以适应SiC MESFET器件的特点^[3,10-11]。

器件建模的目的是利用模型进行电路设计, 因

此把模型嵌入到CAD软件中是器件建模不可缺少的一步。对于SiC MESFET, 为了更好地描述器件的输入/输出特性, 不仅采用的模型方程与GaAs MESFET不同, 而且需要采用更好的电路拓扑结构。目前还未见有商用微波CAD软件具备相关的模型库。本文选用常用的微波CAD软件——安捷伦ADS作为电路模拟软件^[12], 建立SiC MESFET非线性器件自定义模型, 再采用ADS中的符号定义器件(SDD)完成模型的嵌入及其验证。

1 SiC MESFET非线性模型

本文采用的SiC MESFET非线性模型拓扑如图1所示, 该模型包含自热效应(I_{th} 、 R_{th} 和 C_{th})、色散效应(I_{rf} 、 R_{rf} 和 C_{rf})和击穿特性(I_{gd} 和 I_{gs})等。漏源电流采用改进的TOM简化模型^[13]:

$$I_{ds} = \frac{\beta(V_{gs} - V_{to})^Q}{(1 + \Omega V_{ds} \beta (V_{gs} - V_{to})^Q)} \tanh \left[\frac{\alpha V_{ds}}{(V_{gs} - V_{to})^m} \right] \quad (1)$$

$$Q = Q_0(1 - \beta(V_{gs} - V_{to})^{Q_1}) \quad (2)$$

$$V_{to} = V_{to1} + \gamma V_{ds} \quad (3)$$

式中 Q_1 为跨导随栅压 V_{gs} 的下降因子, 用来描述峰值跨导现象和跨导曲线的曲率; m 为饱和电压系数随 V_{gs} 的偏移系数, 用于描述电流在不同漏电压偏置下达到饱和。

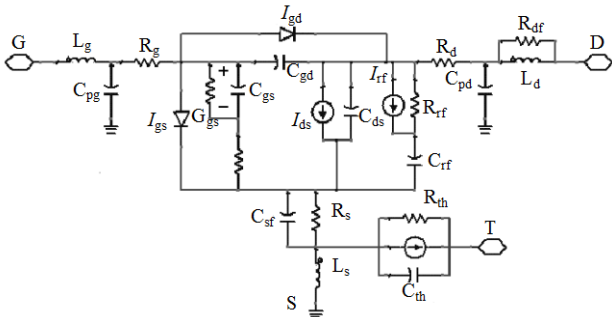


图1 非线性等效电路模型拓扑

基于Angelov非线性电容模型建立的偏置相关的栅源电容方程为:

$$C_{gs} = C_{gs0} + C_{gs0}(1 + \tanh(F_1))(1 + \tanh(F_2)) \quad (4)$$

式中 $F_1 = M_1 + P_{11}V_{gs} + P_{111}V_{ds}$; $F_2 = M_2V_{gs} + P_{21}(M_{21} + V_{ds} + V_{gs})$ 。 $P_{21}(M_{21} + V_{ds} + V_{gs})$ 项反映了在漏极偏置较小时, 栅压偏置对沟道耗尽层的调制效应, 从而使得 C_{gs} 在不同的漏电压处呈现饱和特性。

栅漏电容的非线性关系形成原因主要是在载流子速度饱和后, 在漏侧形成的电荷累积和边缘电流的共同作用, 其中漏侧电荷是形成非线性电容关系的主要因素, 而边缘电容的实际变化趋势则较为微弱。由于SiC MESFET高漏偏置电压 $V_{ds} > 100$ V, 电荷累积所呈现的非线性要比GaAs MESFET更为明显, 因此本文构造了指数函数代替双曲正切函数描述栅漏电容的非线性关系:

$$C_{gd} = C_{gd0} + C_{gd0} \exp(F_3) \exp(F_4) \quad (5)$$

式中 $F_3 = M_3 - P_{31}V_{ds}$; $F_4 = M_4 + P_{41}V_{gd} - M_4V_{gs}V_{gd}$ 。

$M_4V_{gs}V_{gd}$ 反映了 V_{gs} 和 V_{ds} 对 C_{gd} 的交叉耦合。结果表明, 在相同栅偏压下该模型在较高漏偏置电压下具有更好的精度。

沟道温度采用电热等效电路模型^[14], 有:

$$\tilde{T} = R_{th} I_{th} + T_0 \quad (6)$$

热电流源(I_{th})等于FET的DC和RF功率耗散:

$$I_{th} = V_{ds}I_{ds} + I_{ds}R_d + (I_{ds} + I_{gs})R_s \quad (7)$$

式中 R_s 和 R_d 为沟道级联电阻; I_{ds} 和 I_{gs} 分别为漏源和栅源电流; R_{th} 为沟道和载体之间的热阻, 与半导体器件的热导率有关; T_0 为载体的温度(或称环境温度, 通常指室温)。

2 SiC MESFET非线性SDD模型实现

在ADS软件中, 自定义非线性器件模型有用户编译模型和SDD两种方法。用户编译模型有较好的用户界面, 但需要编写复杂的C语言源代码, 过程复杂; SDD是在原理图中输入模型方程, 通过定义端口数、端口电压、端口电流及其导数建立的器件模型。SDD建模过程简单, 模型可在ADS中的任何仿真器中使用。因此, 本文采用SDD实现自定义器件模型的嵌入。

SDD建模是通过计算各个节点电流来实现的, 因此, 首先需要对器件模型进行节点编号, 图2为SiC MESFET本征器件等效电路拓扑及其节点编号。

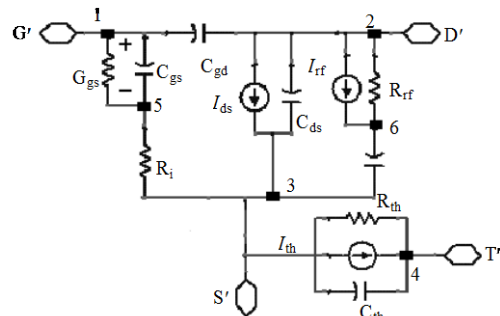


图2 本征器件模型及其结点编号

对应的SDD模型如图3所示。端口1~6对应为等效电路拓扑中的1~6, 7~10是建立4个电容两端电压的导数, 图中SDD模型各端口程序为:

```

SDD10P
SDD10P1
I[1,0]=Cgd*_v7+Cgs*_v8+(_v1-_v5)*Ggs
I[2,0]=Cds*_v10+(_v2-_v6)/Rrf-Cgd*_v7
I[2,2]=Ids+Irf
H[2]=exp(-2*j*PI*freq*tau*1e-12)
I[3,0]=(_v5-_v3)/Ri-Cds*_v10-Crf*_v9
I[3,2]=-Ids
I[4,3]=-Ith
H[3]=exp(-2*j*PI*freq*Rth*Cth)
F[5,0]=(_v1-_v5)*Ggs+Cgs*_v8-(_v5-_v3)/Ri
F[6,0]=(_v2-_v6)/Rrf-Crf*_v9
F[6,2]=Irf
F[7,1]=_v1-_v2
F[7,0]=-_v7
F[8,1]=_v1-_v5
F[8,0]=-_v8
F[9,1]=_v6-_v3
F[9,0]=-_v9
F[10,0]=_v2-_v3
F[10,0]=-_v10
    
```

C[1]=
Cport[1]=

最终建立的SiC MESFET非线性SDD模型在ADS仿真原理图中的模型库如图4所示。

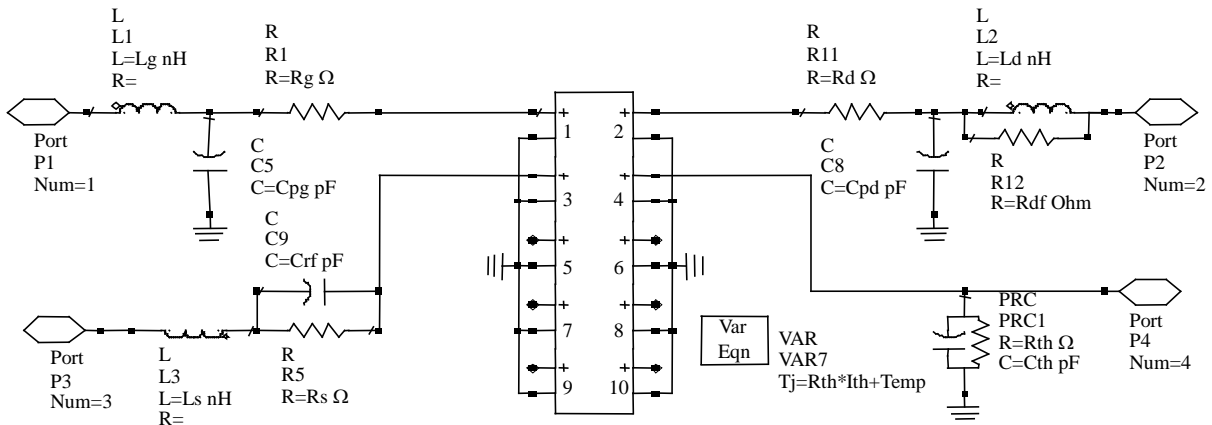


图3 SiC MESFET非线性SDD模型

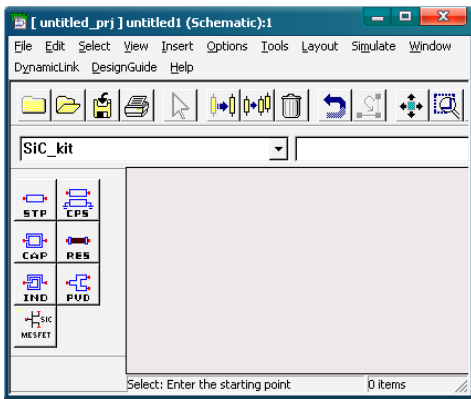


图4 SiC MESFET非线性模型在ADS中的模型库

型计算的S参数曲线与实测曲线吻合较好。在工作频率较高($f > 5$ GHz)时的 S_{12} 相对存在的误差较大,主要原因是该模型没有考虑所有寄生参数的频率相关性,使得本身值较小的 S_{12} 对频率更为敏感。在实际应用中,这个误差对于功率SiC MESFET器件及其电路来说是可以容忍的^[14]。 S_{11} 和 S_{22} 存在较小误差的原因是模型没有考虑 G_{gs} 、 R_i 和寄生参数偏置相关性^[15]。在 $V_{ds}=20$ V, $V_{gs}=-6$ V偏置条件下,非线性模型参数如表1所示。

表1 $V_{ds}=20$ V, $V_{gs}=-6$ V偏置条件下非线性模型参数

V_{to}/V	$\beta(\times 10^{-4})$	α	γ_{ac}	γ_{dc}
-14.400	5.500	0.700	0.038	0.076
Ω	m	Q_0	Q_1	C_{gs0}/pF
0.015	1.200	2.003	1.790	3.940
M_1	M_2	M_3	M_4	P_{111}
0.300	0.100	1.000	0.900	0.110
P_{11}	P_{21}	P_{31}	P_{41}	C_{gd0}/pF
0.120	0.200	0.010	0.090	2.100

3 SiC MESFET非线性模型验证

验证采用的SiC MESFET器件尺寸为栅长1 μm , 栅宽300 μm , 采用载片测试台测量。计算和测试得到的直流I-V结果比较如图5所示, 计算结果和实测结果在I-V全域内都吻合良好, 表明模型具有较高的精度。

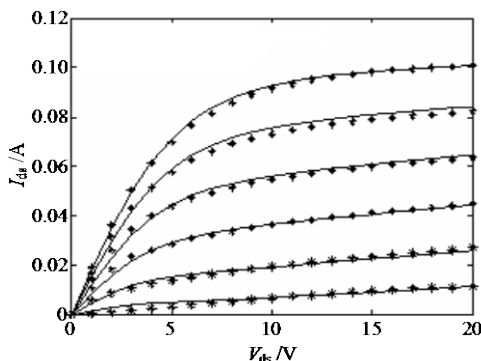
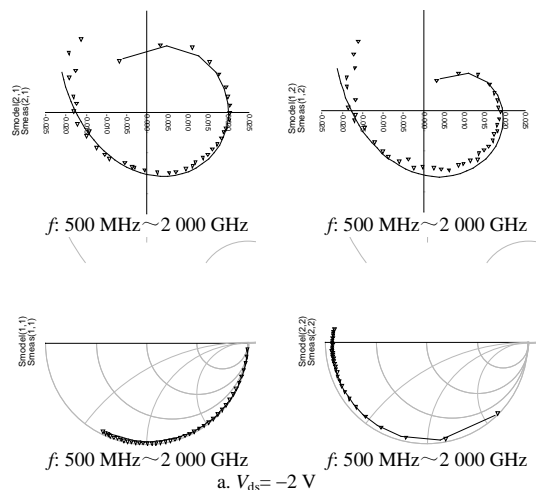


图5 改进的TOM简化模型和实测DC I-V曲线比较

在 $V_{ds}=20$ V, V_{gs} 分别为-2 V、-6 V和-15 V的偏置条件下, ADS中仿真和实测结果比较如图6所示。由图6可见, 在不同偏置条件下, 利用本文非线性模



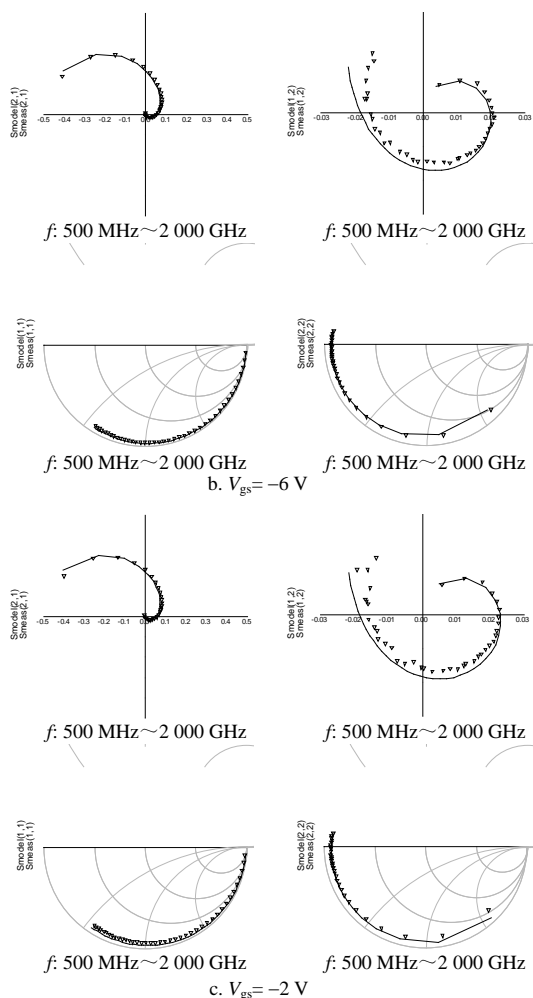


图6 不同栅压偏置下利用非线性模型计算和测试的 S 参数比较(正三角符号为实测结果, 实线为计算结果)

在工作频率为3.2 GHz, 偏置电压分别为 $V_{ds}=20$ V和 $V_{gs}=-6$ V时, 利用本文非线性模型在ADS中采用单频负载牵引法进行谐波平衡仿真, 得到的最大饱和输出功率达21.1 dBm, 1 dB增益压缩点输出功率为17.7 dBm, 如图7所示。该结果和大栅宽SiC MESFET器件测试结果较为吻合。

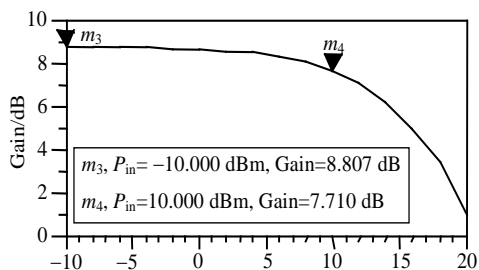


图7 功率增益与输入功率的关系

4 结论

针对商用CAD软件中没有SiC MESFET非线性模型, 本文基于GaAs FET经典模型, 建立了适合SiC

MESFET的非线性模型, 并利用商用软件ADS中的SDD实现嵌入, 最终建立了完整的SiC MESFET模型库。通过国内工艺线产品验证, 该模型具有较好的精度。

参考文献

- [1] CHARLES E W. Comparison of SiC, GaAs, and Si RF MESFET power densities[J]. IEEE Transaction on Electron Device Letters, 1995, 16: 451-453.
- [2] ANDERSSON K, SüDOW M. Fabrication and characterization of field-plated buried-gate SiC MESFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2006, 27(7): 573-575.
- [3] NILSSON P, ALLERSTAM F, SüDOW M, et al. Influence of field plates and surface traps on microwave silicon carbide MESFETs[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2008, 55(8): 1875-1879.
- [4] CREE. Available[EB/OL]. [2008-11-20]: <http://www.cree.com>
- [5] 杨林安, 张义门, 吕红亮, 等. 4H-SiC射频功率MESFET大信号直流I-V特性解析模型[J]. 半导体学报, 2001, 22(9): 1160-1164.
YANG Lin-an, ZHANG Yi-men, LÜ Hong-liang, et al. Analytical model of large-signal DC I-V characteristics for 4H-SiC RF power MESFET's[J]. Journal of Semiconductors, 2001, 22(9): 1160-1164.
- [6] 徐跃杭, 徐锐敏, 延波, 等. 4H-SiC MESFET直流I-V特性解析模型[J]. 微电子学, 2007, 37(1): 1-4.
XU Yue-hang, XU Rui-min, YAN Bo, et al. An analytical model of I-V characteristics of 4H-SiC power MESFET's[J]. Microelectronics, 2007, 37(1): 1-4.
- [7] ANGELOV I, BEBGTSSON L, GARCIA M. Extensions of the Chalmers nonlinear HEMT and MESFET model[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1996, 44(10): 1664-1670.
- [8] CURTICE W R, ETTERNBERG M. A nonlinear GaAs FET model for use in the design of output circuits for power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1985, 33: 1383-1393.
- [9] MCCAMANT A, CONMACK G M, SMITH D. An improved GaAs MESFET model for SPICE[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1990, 38(6): 822-824.
- [10] LIU W, ZETTERLING C M, OSTLING M. Thermal-issues for design of high power SiC MESFETs[C] //High Density Microsystem Design and Parkaging and Component Failure Analysis. Shanghai, China: [s.n.], 2004: 331-335.
- [11] ROSCHKE M, SCHWIERZ F. Electron mobility models for 4H, 6H, and 3C SiC[J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 2001, 48(7): 1442-1447.
- [12] Aglient: ADS 2005A user manual[M]. Palo Alto, USA: Aglient, 2006.

(下转第453页)

步利用 t 检验方法得到闭眼与开眼两种情况下具有显著性差异的 α 波功率在大脑中的具体位置,探讨了闭眼与开眼状态下大脑活动的差异。

早期对闭眼和开眼差异的研究结果多集中在位于枕-顶叶的 α 波的幅度的变化,闭眼幅度大于开眼幅度。本文的结果显示额叶 α 波幅度也发生了显著性变化,在闭眼静息状态下 α 波在额叶、顶叶、枕叶这些脑区中可能存在一定的主动性活动,它们可能是用来有组织地维持大脑的静息状态;当被试的状态变为开眼静息时,随着视觉信息的输入,这些区域的活动减弱。

参 考 文 献

- [1] 尧德中. 脑功能探测的电学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
YAO De-zhong. Electrical theories and methods of brain functional measurement[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [2] CHEN A C N, FENG W, ZHAO H, et al. EEG default mode network in the human brain: Spectral regional field powers[J]. NeuroImage, 2008, 41(2): 561-574.
- [3] MORETTI D V, BABILONI C, BINETTI G, et al. Individual analysis of EEG frequency and band power in mild Alzheimer's disease[J]. Clin Neurophysiol, 2004, 115(2): 299-308.
- [4] JAUSOVEC N, HABE K. The influence of auditory background stimulation (Mozart's sonata K. 448) on visual brain activity[J]. Int J Psychophysiol, 2004, 51(3): 261-271.
- [5] BASTIAANSEN M C M, POSTHUMA D, GROOT P F C, et al. Event-related alpha and theta responses in a visuo-spatial working memory task[J]. Clin Neurophysiol, 2002, 113(12): 1882-1893.
- [6] RAY W J, COLE H W. EEG alpha activity reflects attentional demands, and beta activity reflects emotional and cognitive processes[J]. Science, 1985, 228(4700): 750-752.
- [7] WOLFGANG K. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis[J]. Brain Research Reviews, 1999, 29(2-3): 169-195.
- [8] VAN DIJK H, SCHOFFELEN J M, OOSTENVELD R, et al. Prestimulus oscillatory activity in the alpha band predicts visual discrimination ability[J]. J Neurosci, 2008, 28(8): 1816-1823.
- [9] LAUFS H, KLEINSCHMIDT A, BEYERLE A, et al. EEG-correlated fMRI of human alpha activity[J]. NeuroImage, 2003, 19(4): 1463-1476.
- [10] LAUFS H, KRAKOW K, STERZER P, et al. Electroencephalographic signatures of attentional and cognitive default modes in spontaneous brain activity fluctuations at rest[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2003, 100(19): 11053-11058.
- [11] MANTINI D, PERRUCCI M G, DEL GRATTA C, et al. Electrophysiological signatures of resting state networks in the human brain[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104(32): 13170-13175.
- [12] PASCUAL-MARQUI R D. Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): Technical details[J]. Method Find Exp Clin, 2002, 24(Suppl D): 5-12.
- [13] XU Yue-hang, XU Rui-min, YAN Bo, et al. Advanced SPICE-modeling of 4H-SiC MESFET[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2007, 5(1): 62-65.
- [14] MAAS A S. Nonlinear microwave and RF circuits[M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2003: 104-107.
- [15] SIMIN G, KOUDYMOV A, TARAKJI A, et al. Induced strain mechanism of current collapse in AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(16): 2651-2653.

编辑 黄 莘

(上接第446页)

编辑 税 红