

应用于空基相控阵雷达的新型功率器件 ——SiC 射频功率 MESFET

杨林安¹, 于春利², 张义门³

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077;

2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038;

3. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)

摘要:根据空基相控阵雷达的工作环境,对4H-SiC材料及SiC功率器件(SiC MESFET)的特点进行了分析。与GaAs器件相比,这种新型器件在空基相控阵雷达领域有广泛的应用前景。同时建立了用于器件CAD技术的SiC MESFET改进型非线性大信号模型,这种基于实验测量的模型通过SPICE模拟器对器件的功率特性进行了分析,与实验结果符合较好。

关键词:空基相控阵雷达;SiC MESFET;射频功率器件;非线性大信号模型

中图分类号:TN958.92 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)03-69-72

相控阵雷达主要分为陆基、海基和空基几种类型。陆基雷达的特点是T/R组件数目庞大,探测距离远,跟踪目标多,但其体积大、耗能高。海基雷达体积相对缩小,但对其抗腐蚀性能要求较高。空基雷达(机载雷达)技术性能较前两种雷达而言则要求更高:1)其体积小,因此内部模块的集成化程度要求高,尤其对T/R组件的体积一定要严格控制(因为相控阵雷达中的T/R组件数量很多)。2)抗高温性能好,这是由于体积缩小后还要保持一定的发射功率所带来的高温结果,内部电路尤其T/R组件中的功率模块一定要在高温下正常工作,而不能依赖于大体积的热沉,否则势必要增大体积。3)效率高,因为在空中能量资源非常宝贵,所以输出效率是功率模块的重要指标。4)抗辐射性能好,因为在空中,粒子辐射剂量比地面大得多,尤其在核环境下,因此雷达内部的器件必须具备较好的抗辐射能力。功率器件具备在高电压、高电场、高频率下大功率输出的能力,这是由于功率模块在体积和数量的限制下必须以少量的功率器件单胞(cell)进行功率合成而达到大输出功率指标,因此单胞的输出功率大大提高。

从上述对相控阵雷达的分析来看,传统的砷化镓(GaAs)射频功率器件已不太适合空基雷达的应用领域,这是因为GaAs射频功率器件的热导率低、击穿电压较低、功率密度低、抗辐射性能不佳。而近年来出现的新型碳化硅(SiC)功率器件,由于其热导率高而适合于高温工作,其电子饱和漂移速度高而适合于射频、微波工作,其临界击穿电场高而适合于高压高场工作,其功率密度大而适合于大功率输出,其抗辐射性能好而适合于核环境工作等优点,因此首先在空基相控阵雷达的功率模块中取代GaAs器件已成为必然的趋势。

1 4H-SiC的材料及功率MESFET性能

近十年来,对SiC材料(它最早被应用于钻头和刀具的耐磨涂层)半导体特性的研究进入了一个高速发展的阶段,基于SiC的器件也形成了商品化,但关键技术,特别是射频、微波领域内的大功率器件仍处在研制阶段,少量民用产品还未形成规模,因此在这个领域内仍是GaAs器件的主导市场。SiC功率器件的应用主要有两个领域:一是应用于移动通信的基站发射机和清晰电视发射系统,二是应用于相控阵雷达系统。

1.1 4H-SiC材料的特性

收稿日期:2000-09-25

基金项目:总装备部国防预研项目(8.1.7.3)

作者简介:杨林安(1965-),男,天津市人,博士生,主要从事新型材料微波功率器件的研究。

SiC 材料的应用类型有 3C - SiC、4H - SiC、6H - SiC 几种类型,在射频和微波波段(主要是 L 波段、S 波段和 X 波段),4H - SiC 以其良好的高频特性而倍受人们关注,本文亦以 4H - SiC 为分析重点。4H - SiC 半导体材料属于宽禁带半导体($E_g = 3.26 \text{ eV}$),这就决定了它的临界击穿电场很高,大约是 GaAs 的 10 倍,其典型击穿电压 $V_{BR} > 100 \text{ V}$ 。其饱和电子漂移速度 $v_s = 2.2 \times 10^{17} \text{ cm/s}$ (是 GaAs 的 3 倍),因此在微波和毫米波波段,4H - SiC 器件会有更好的应用前景。虽然其电子迁移率比 GaAs 低得多(从这一点上看 4H - SiC 在高频小信号条件下不具备与 GaAs 的竞争力),但是在高场条件下,其饱和速度会提高,因此 4H - SiC 器件的最佳工作条件是高场高频工作,此时 GaAs 由于自身的缺陷而失去其优势;另外重要的一点是 4H - SiC 的热导率很高(可达 $4.9 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$),大约是 GaAs 的 10 倍,因此它允许高功率密度工作($4 - 6 \text{ W/mm}$)。在保持大功率的同时器件结构可以缩小,无须 GaAs 功率器件所采用的大体积热沉。由于在室温下存在“冻析效应”,4H - SiC 的施主离化率较低(70% ~ 80%),而随温度升高离化率提高,这是高温工作的一个有利条件,它会改善器件性能,有报导^[1]证实:在 500 °C 的高温下,施主电离率为 94.5%,饱和速率为 $1.38 \times 10^7 \text{ cm/s}$,4H - SiC JFET A 类放大器在射频工作时,仍然达到 13.3% 的功率附加效率(PAE),且 $f_T = 6.1 \text{ GHz}$ 。同时,随温度升高,SiC 器件的临界击穿电压升高^[2],这在高温条件下运用是非常有利的。

影响 SiC 材料应用的最大障碍是低缺陷 SiC 基片的制造。由于基片生长工艺难度很大,虽然目前 SiC 衬底缺陷得到了有效控制,但基片尺寸仍很小(不到 2 英寸直径),这严重影响了器件制造规模,即使世界上最大的 SiC 基片供应商 Cree Research Inc. (NC. USA)在基片制造上也未有长足的进步。但是对缺陷(主要是“微管缺陷”)的有效控制足以使器件的研制向前迈进了一大步。其次,由掺杂浓度决定的 SiC 衬底电阻率也是重要的问题,高电阻率的 SiC 衬底有助于提高工作频率,但高电阻率 SiC 衬底的制造很困难,广泛采用的是在低阻 N 型衬底上形成一层 P⁻ 的 Buffer 层来提高衬底绝缘性,但其衬底寄生效应对频率响应会造成一定的影响。目前半绝缘衬底的应用使得器件工作频率 f_T 和 f_{max} 有大幅度提高^[3]。

1.2 4H - SiC 功率 MESFET(金属-半导体场效应晶体管)

4H - SiC 功率 MESFET 是在 L、S、X 波段应用最广泛的器件类型,这是因为在高频应用领域 MESFET 结构优于其它的器件结构。典型的 4H - SiC MESFET 的剖面结构如图 1 所示,在实际和模拟器件结构中为了适应大功率的要求而广泛采用非对称栅结构^[4-5],这一栅结构已被大量应用于 GaAs 功率器件中。

衡量 4H - SiC MESFET 功率器件的交流指标主要有增益(G)、输出功率密度(P_o)、功率附加效率(PAE)、互调失真(IMD)等。应用在 L 波段时,Allen、Palmour 等人报道^[6] $f = 1.8 \text{ GHz}$,沟道掺杂为 $1.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、栅面积为 $0.7 \times 332 \mu\text{m}$,芯片测量得到 $P_o = 2.8 \text{ W/mm}$,PAE = 12.7%,作为 B 类放大器,可达到 $P_o = 2 \text{ W/mm}$ ($V_{ds} = 40 \text{ V}$, $I_{ds} = 4 \text{ mA}$)、PAE = 50%、 $G = 12.4 \text{ dB(Linear)}$ 。在 $f = 850 \text{ MHz}$,作为 A 类放大器, $P_o = 3.1 \text{ W/mm}$ ($V_{ds} = 50 \text{ V}$, $I_{ds} = 40 \text{ mA}$)、PAE = 38.9%、 $G = 19 \text{ dB(Linear)}$,而作为 B 类放大器, $P_o = 2.3 \text{ W/mm}$ ($V_{ds} = 40 \text{ V}$, $I_{ds} = 4 \text{ mA}$)、PAE = 65.7%、 $G = 15 \text{ dB(Linear)}$ 。通过测 IMD 值可以反映 A 类放大器的线性性能,在 $f = 850 \pm 5$

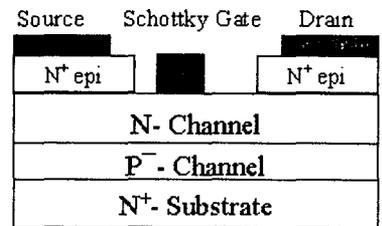


图 1 4H - SiC 功率 MESFET 剖面图

MHz 的双音频测试中,三级互调失真 $\text{IMD3} = 23 \text{ dB}$ ($V_{ds} = 40 \text{ V}$, $I_{ds} = 37 \text{ mA}$)。应用在 X 波段时,由于采用空气桥、半绝缘衬底、减小栅长、加大栅指宽度等技术,使器件的射频微波性能有所提高。在 $f = 10 \text{ GHz}$ 时, $0.5 \mu\text{m} \times 2 \text{ mm}$ (双栅指)的 MESFET 在 AB 类工作状态下,可达到 $P_o = 3 \text{ W/mm}$ 、PAE = 3.4%、 $G = 5.1 \text{ dB}$ ($V_{ds} = 40 \text{ V}$, $I_{ds} = 10\% I_{ds}$)^[7]。最新报道^[3]显示,48 mm 栅宽的单级 MESFET 在混合电路封装条件下, $f = 3.1 \text{ GHz}$ 时测试;可达到 80 W 连续波激励的输出功率,PAE = 38%、 $G = 7.6 \text{ dB}$ 。

温度升高使 SiC 的电子迁移率 μ 和饱和速度 v_s 有所下降,因此对高频工作的器件特性有一定的影响,但高场会使饱和速度上升,在 $E = 2 \times 10^{15} \text{ V/cm}$ 的高场条件下,4H - SiC 在 23 °C、320 °C、500 °C 的饱和速度分别为 $2.2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 、 $1.6 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 、 $1.38 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。

2 SiC MESFET 非线性大信号模型的建立

精确的非线性大信号模型的建立是器件 CAD 技术的关键。随着 CAD 技术在器件和电路设计中所起的作用越来越重要,对各类器件的模型分析则愈加引起人们的重视。目前,国际上对小信号线性模型的研究技

术进入了比较成熟的阶段,尤其对 Si、GaAs 等传统材料器件的模拟已达到了商业化水平,但对大信号非线性器件模型的研究仍未达到令人满意的效果。虽然在射频领域内对 GaAs 功率器件模型的研究取得了一定的成果,但还远未达到对小信号的研究水平,对 SiC 功率器件模型的研究报道则更少。对于 SiC 功率器件,我们以 GaAs 功率器件的大信号非线性模型为基础,采用基于实验测量的多项式拟合模型来描述器件内部各非线性参量 (I_{ds} 、 I_{gs} 、 I_{gd} 、 C_{gs} 、 C_{gd} 、 C_{ds} 等)的瞬态及稳态特性。4H-SiC MESFET 大信号非线性模型的等效电路拓扑结构如图 2 所示。考虑 4H-SiC 材料的特点, R_{ds} 的值很大而未画出,另外, C_{ds} 在大偏压下受 V_{ds} 和 V_{gs} 的影响很小,可近似取为常数。而 $I_{ds}(V_{gs}, V_{ds})$ 、 $C_{gs}(V_{gs}, V_{gd})$ 和 $C_{gd}(V_{gs}, V_{gd})$ 三个非线性参量的数学模型如方程(1)~(3)所示^[8]

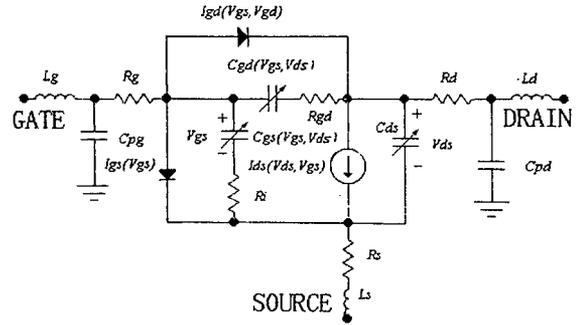


图2 4H-SiC MESFET 射频大信号非线性等效电路

$$I_{ds}(V_{ds}, V_{gs}) = I_{pk}(1 + \tanh\Psi)(1 + \lambda \cdot V_{ds}) \tanh(\alpha V_{ds}) \quad (1)$$

其中,

$$\Psi = P_1(V_{gs} - V_{pk}) + P_2(V_{gs} - V_{pk})^2 + P_3(V_{gs} - V_{pk})^3$$

$$\lambda = A_1 V_{gs} + A_2 V_{gs}^2 + A_3 V_{gs}^3$$

I_{pk} 、 V_{pk} 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 A_1 、 A_2 、 A_3 是基于测试数据的拟合参数。

方程(1)中的 λ 表达式是我们对 Chalmers 非线性模型的改进(在 Chalmers 模型中 λ 为常数),目的是为了与实验数据更好地拟合。用双曲正切函数表示漏源电流 I_{ds} 能较准确地反映大信号非线性的物理特性。根据 C_{gs} 、 C_{gd} 随 V_{gs} 和 V_{gd} 的变化规律,我们建立了两个自变量的线性与非线性项的混合多项来描述 C_{gs} 和 C_{gd} 的特征:

$$C_{gs}(V_{gs}, V_{gd}) = C_{s1} + C_{s2} V_{gs} + C_{s3} V_{gs}^2 + C_{s4} V_{gd} \quad (2)$$

$$C_{gd}(V_{gs}, V_{gd}) = C_{d1} + C_{d2} V_{gd} + C_{d3} V_{gd}^2 + C_{d4} V_{gs} \quad (3)$$

其中, $V_{gd} = -(V_{ds} - V_{gs})$ 。而 $I_{gs}(V_{gs})$ 和 $I_{gd}(V_{gs}, V_{gd})$ 可采用 Schottky 二极管方程来描述:^[9]

$$I_{gs}(V_{gs}) = I_S[\exp(V_{gs}/NV_t) - 1] - I_{BD}[\exp(-V_{gs}/V_{BD}) - 1] \quad (4)$$

$$I_{gd}(V_{gs}, V_{gd}) = I_S[\exp(V_{gd}/NV_t) - 1] - I_{BD}[\exp(-V_{gd}/V_{BD}) - 1] \quad (5)$$

我们采用文献[4]中相同的结构参数和电学特性,按上述模型模拟出的结果与其测试值相吻合,特别是直流大信号特性符合较好,如图3所示。在电流控制区比传统模型更精确。通过SPICE模拟器的交流分析,在 $f = 1.8 \text{ GHz}$ 、输入输出匹配阻抗 $Z_{in} = 23 - j80(\Omega)$ 、 $Z_{out} = 41 + j54(\Omega)$ 的条件下, $PAE = 34.8\%$ (AB类工作), $P_o = 0.8 \text{ W}$ ($V_{ds} = 20 \text{ V}$, $I_{ds} = 80 \text{ mA}$),与测试数据相吻合。

3 结论

通过对 4H-SiC 新型半导体材料特性的分析,对 MESFET 射频功率器件在 L 波段、S 波段、X 波段应用的最新数据的分析,充分证明了它在相控阵雷达领域中的应用潜力。同时,在传统 GaAs 功率器件的模型基础上,建立了适合于 SiC MESFET 射频功率器件的改进模型,模拟器 SPICE 的模拟结果证明这种基于测试数据的大信号非线性模型适合于描述射频及微波波段的 SiC MESFET 功率器件。

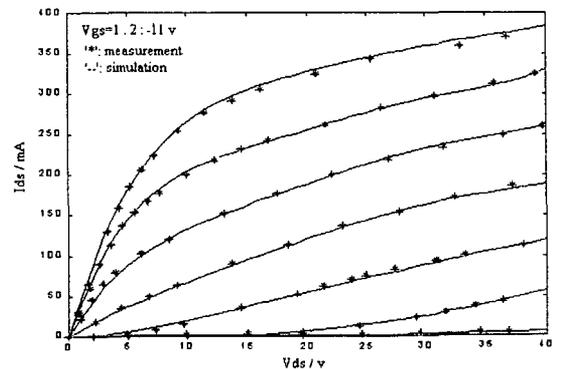


图3 4H-SiC MESFET 直流输出 I-V 特性

参考文献:

[1] Hafield CW, Bilbro GL, Allen ST, et al. DC I-V Characteristics and RF Performance of A 4H-SiC JFET at 773K[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1998, 45(9): 2072-2074.

- [2] Raghunathan R, Baliga BJ. Temperature Dependence of Hole Impact Ionization Coefficients in 4H and 6H - SiC[J]. Solid - State Electronics, 1999, 43(2) : 199 - 211.
- [3] Allen ST, Palmour JW. Progress in High Power SiC Microwave MESFETs [A]. Matloubin M. IEEE MTT - S, Microwave Symp. Digest [C]. Anaheim, California; IEEE Inc. 1999. 321 - 324.
- [4] Siriex D, Noblanc O, Barataud D, et al. A CAD - Oriented Nonlinear Model of SiC MESFET Based On Pulsed I (V), Puled S - Parameters Measurements [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1999, 46(3) : 580 - 584.
- [5] Allen ST, Salder RA, Palmour JW. Silicon Carbide MESFETs for High Power S - Band Applications [A]. Koepf GA. IEEE MTT - S, Microwave Symp. Digest [C]. Denver, Colorado; IEEE Inc. 1997. 57 - 60.
- [6] Allen ST, Palmour JW. SiC MESFETs with 2 W/mm and 50% PAE at 1.8 GHz [A]. Ranson RG. IEEE MTT - S, Microwave Symp. Digest [C]. San Francisco, California; IEEE Inc. 1996. 681 - 684.
- [7] Morse AW, Esker PM, Siriam S, et al. Recent Application of Silicon Carbide to High Power Microwave [A]. Koepf GA. IEEE MTT - S, Microwave Symp. Digest [C]. Denver colorado; IEEE Inc. 1997. 53 - 56.
- [8] Xiao Q, Ooi BL, Ma J. An Improved Chalmers Model for A GaAs MESFET [J]. Microwave and Optical Technology Letter, 2000, 24(5) : 311 - 316.
- [9] Parker AE, Skellein DJ. A Realistic Large - Signal MESFET Model for SPICE [J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(9) : 1563 - 1568.

A Novel Power Device Applied in Airborne Phased Array Radar ——SiC RF Power MESFET

YANG Lin - an¹, YU Chun - li², ZHANG Yi - men³

(1. The Telecommunication Engineering Institute of the Air force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. The Engineering Institute of the Air force Engineering University, Xi'an 710038, China ;3. Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: 4H - SiC material and MESFET power device are analyzed according to the operating environment of the airborne phased array radar. A comparison between SiC and GaAs device shows that this novel device finds wide applications in the field of airborne phased array radar. An improved nonlinear large signal model of SiC MESFET for device CAD technology is also developed, which is a model based on experimental measurement. It is used to analyze the power performance of device through SPICE simulator. A good agreement between simulations and measurements is obtained.

Key words: airborne phased array radar; SiC MESFET; RF power device; nonlinear large signal model