



白皮书

50 V RF LDMOS: ISM、广播和雷达应用的 理想RF功率技术

作者：Pierre Piel、Wayne Burger、David Burdeaux、Warren Brakensiek

飞思卡尔半导体

www.freescale.com/rfpower

一. 引言

RF LDMOS(RF横向扩散MOS,以下简称LDMOS)是频率范围从900MHz到3.8GHz的高功率无线基础设施功率放大器(PA)应用所采用的主要器件技术。LDMOS在20世纪90年代初期就开始广泛部署在高功率蜂窝基础设施PA应用中。与原来使用的硅双极晶体管器件技术相比,该器件技术具有明显的优势,包括卓越的线性和效率、高增益、兼容低成本封装平台。进入蜂窝基础设施市场的短短几年时间内,LDMOS就成为主导技术,基本上完全取代了硅双极晶体管。LDMOS技术一直不断演进,以满足蜂窝基础设施市场日益严苛的需求,实现更高的效率、增益、功率和频率⁽¹⁻⁸⁾。

LDMOS器件结构高度灵活,尽管传统蜂窝基础设施市场一直关注28-32伏,但飞思卡尔半导体多年来一直致力于开发28V平台的50V版本。几年前,飞思卡尔将其50V开发重点放在蜂窝基础设施市场以外的应用,包括工业、科研和医疗(ISM)、广播和雷达市场(以下简称RF功率市场),在这里,更高的功率密度、兼容商用48V直流电源的能力是主要竞争优势。20世纪90年代初期使双极晶体管全面占领蜂窝基础设施市场的的众多属性在RF功率市场也同样意义非凡,即高功率、高增益、高效率、线性、低成本和高可靠性。此外,RF功率市场要求非常高的RF耐用性,而这正是LDMOS的强项。

由飞思卡尔为RF功率市场设计的第一代50V产品采用被称为第六代极高压(VHV6)平台构建,完全符合要求,且批量出货。本文将描述VHV6器件结构,包括超过竞争器件技术的优势。RF功率的耐用性要求比蜂窝基础设施更严格。本文将包括特别针对提高耐用习惯性能的器件和设计考虑事项。此外,文中还将介绍该平台中产品的设计特点。

二. LDMOS 器件技术

图1描述了典型LDMOS晶体管单手指的横截面。它包括一个将N+源电动连接到P+散热器的源金属区,P+散热器反过来又通过P+底座连接到背面源金属。这种专利特性大大降低了源电感,提高了性能,同时还能够让冲模直接连接到电热传导封装法兰,以满足低成本封装平台要求。

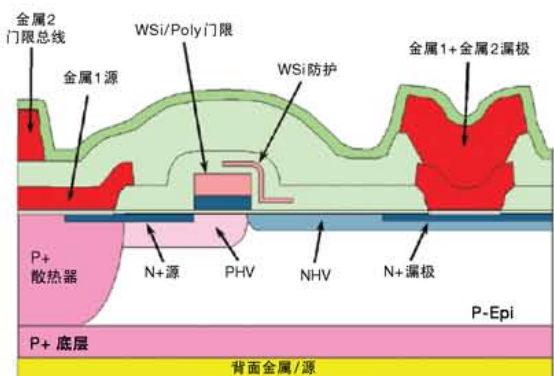


图1：LDMOS器件的横截面

P型(掺硼)“PHV”扩散确定器件的阈值电压和打开特征。WSi/多晶硅门限提供低门限接入电阻，这对RF功率器件非常重要。门限和高掺杂N+漏极区域之间的低掺杂浓度砷n类“NHV”漂移区域能支持高度细分的电压、低导通电阻(RD_{son})和良好的热载流子注入(HCI)可靠性。堆栈铝漏极金属设计符合高可靠性的电迁移规格。金属2门限总线与门限并行运行，定期连接到门限WSi/多晶硅堆栈，可降低电阻。接地防护结构(图中未显示接地带)也已部署，可以减少漏极和门限之间的反馈电容，并控制表面电场，在提高器件性能的同时，不影响细分电压或HCI边际。

50 V LDMOS RF功率产品系列引领蜂窝基础设施市场的另一项飞思卡尔创新技术是增强型ESD保护结构，该结构可以容忍门限引线采用的适度反向偏压条件(见图2)。这种增强型器件非常有益的一种例子是高输入RF功率水平下的C级操作。负压小幅摆动过程中，RF摆幅很容易打开标准ESD结构，而增强型ESD器件仍保持关闭。RF功率产品中采用的增强型结构要比操作过程可能遇到的各种操作条件强劲得多。

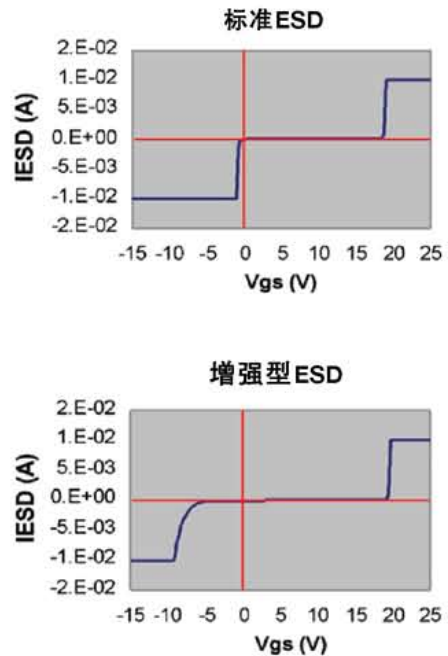


图2：标准和增强型ESD保护器件的I-V个特征

A. 技术比较

RF功率市场的主要竞争技术是硅VMOS(垂直MOS)器件，更确切的说是28 V LDMOS。与LDMOS器件相比，VMOS器件主要是横向制造的器件，具有重要垂直组件，以实现适当细分电压。与表面或水平制造相比，垂直度数和掺杂水平控制受到固有限制，垂直结构通常依赖硅外延进行掺杂和厚度控制，而横向结构可以利用现代制造中的表面粗糙度光石版照相功能，而掺杂的确定具

有高级精确度，使用离子注入方法(尖端CMOS技术采用的相同先进方法)。

这三种技术(VMOS、28 V LDMOS和50 V LDMOS)的性能比较如表1所示，比较使用了各种度量指标，这些度量指标对于RF功率市场的成功非常重要。彩色编码中红色表示差，黄色表示中，绿色表示强。

属性	Si VMOS	28V RF-LDMOS	50V RF-LDMOS
P1dB的CW效率	3	5	5
功率增益	3	5	5
耐热性	3	4	5
CW封装的功率密度	3	3	4
高内在Z输入/Z输出(宽带)	3	3	4
模上无源集成	2	4	4
可变性/性能扩展	2	4	4
技术成熟度	5	5	4
可靠性	4	5	5

表1：功率属性与器件技术的比较

度量范围从1到5，5表示最高或最好。从度量标准列表向下，LDMOS具有出众增益和效率，可以追溯到最初由蜂窝基础设施市场驱动的开发成果，在这一市场，这些参数和器件结构优势(如表面粗糙度自对准门限和防护等)一直至关重要，以减少反馈电容。LDMOS器件具有热阻抗优势是因为它具有背后源，可以直接连接到热电方式传导的封装法兰，封装法兰反过来直接安装到散热器。典型VMOS器件在晶片背部具有漏极，要求将冲模连接到电绝缘法兰材料，这将提高这种器件结构的有效热阻抗。LDMOS封装产品的出色热传导性在特定封装中能够达到非常高的CW功率水平，尤其是50 V技术天生具有比28 V变量更高的功率密度。此外，50 V LDMOS的每瓦特(W)输出电容比竞争50 V Si技术一般低35%，从而使它非常适合宽带应用。

蜂窝基础设施市场的LDMOS产品通常采用集成的匹配网络制造，使LDMOS拥有on-die无源器件(感应器、电容器)。LDMOS制造流程的横向特征采用制造流程，可以控制到非常高的精确水平，与需要更少的良好控制流程(例如硅外延)才能形成结构的一些关键活动区域的VMOS相比，提高可变性和性能。尽管VMOS和LDMOS是成熟器件技术，50 V LDMOS变量对于RF功率市场是相对较新产品。最后，LDMOS技术以其高可靠性，已经展示出良好的业绩记录，在严苛蜂窝基础设施市场拥有近20年的广泛部署历史。

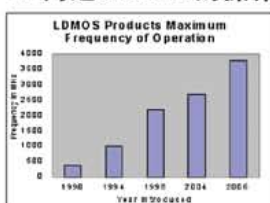
B. 技术发展趋势

飞思卡尔以其在28 V和50V LDMOS的强劲开发项目中的独特优势，成为RF功率和蜂窝基础设施市场的领先供应商。开发项目的这种相互渗透加速了两种市场的发展，将研发投资的影响扩展更广泛的产品空间。

过去几年出现了几个趋势，图3显示，蜂窝基础设施和RF功率市场出现的四个趋势。第一个是操作频率提高，符合要求的产品

支持高达28 V、3.8GHz的操作。飞思卡尔的下一代50 V平台将支持频率超过3GHz的产品。第二个优势是高功率多阶IC的发布或具有集成输入和输出匹配网络的离散器件，这种高功率RF器件在蜂窝基础设施市场很常见。用于RF功率市场开发的产品包括集成匹配网络，在简化使用的同时，保持宽带性能。

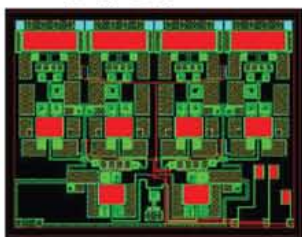
1. 高达3.8GHz的操作



3. 经济超模压塑料封装



2. 多阶电源IC



4. 50 V LDMOS技术

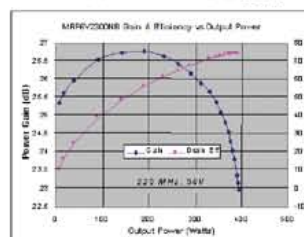


图3：LDMOS发展趋势

第三个主要趋势是为高性能RF应用采用超模压塑料(OMP)。OMP是目前市场上成本最低的封装技术。飞思卡尔率先将OMP用于蜂窝基础设施应用，从而进一步巩固了领导地位，并已经将这种经验应用到RF功率产品系列。飞思卡尔将继续加大封装开发，重点放在提高可以适应的功率水平。最后一个趋势是继续大力投资RF功率市场的50 V LDMOS开发。而且随着事态的发展，将把最初针对50 V RF功率市场的开发应用到蜂窝基础设施市场的产品中。

三. 提高耐用性

A. MOSFET中的耐用性

由于内部功率消耗，MOSFET的耐用性故障是器件的最大热故障。按照既定的RF设计和机械工程原理设计的功率放大器内部，正常的器件操作不会出现这种故障。MOSFET的强度故障是漏极细分(碰撞电离)事件的结果。电离事件的发生是因为固有门限和漏极终端波形驱动下的MOSFET内部的电荷分配。图4a和4b显示了采用MOSFET的普通共源PA电路以及MOSFET的详细示意图。

出现三种基本强度故障机制是因为MOSFET内部非常高的功率消耗和相关热损伤，图4b中的示意图

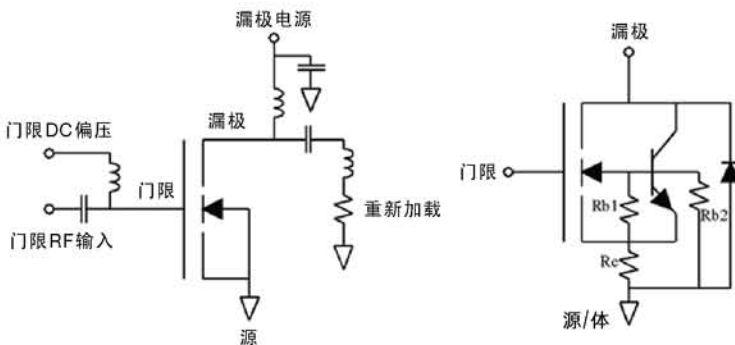


图4a和4b: PA和MOSFET的共源示意图

图说明了这三种机制。前面两种机制涉及MOSFET漏极接合的基本细分，横向通过信道或垂直通过漏极，到达源接合隔离。第三种机制由碰撞电离事件触发，是寄生双极器件的自偏压和快速返回，漏极电离事件成为这种行为的先决条件。如果某个这种

电离事件之后出现充足的内部MOSFET功率消耗，超过器件的正常热设计，巨大器件故障可能出现。双极快速返回行为特别容易出问题，因为温度的正反馈机制可能引起双极晶体管(BJT)的备有文件记录的热失控现象。

B. LDMOS耐用性提高

MOSFET的耐用性行为不能从PA或PA的源和负荷的匹配网络分离，然而，可以将根本器件改进融入MOSFET，提高器件经受PA压力的能力。可以进行内部器件结构改造，适应三种碰撞电离机制，改变电离事件发生的条件，并改变寄生双极器件特征。图5说明了VHV6 LDMOS器件从源到漏极的横截面，显示了三种不同设计的碰撞电离速度和位置。

类似LDMOS的RF PA的实际强度描述通常要改变PA(负荷错配、较大漏极电源电压、较短信号增

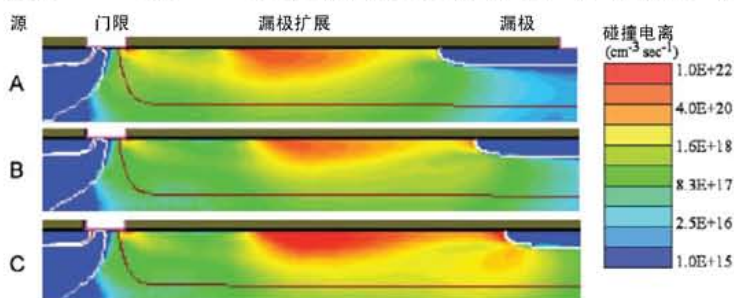


图5：支持VHV6 LDMOS器件设计的碰撞电离

加时间)的操作特征，以提高MOSFET的压力，确定故障点位置。图6显示了耐用性目标功能(三个实际耐用性压力因数的合成测量)和三种频率在1030到1090 MHz之间的VHV6 LDMOS MRF6V 10250HS脉冲器件

应用的不同器件设计的比较。如这些图表所示，通过精心设计MOSFET，相同PA电路和压力可以实现非常巨大的VHV6 LDMOS耐用性性能改进。作为一种参考，图6风格A符合P3dB的5:1 VSWR条件(超过额定功率输出)。LDMOS VHV6平台的开发基于第六代超高压(HV6)32 V平台和50V LDMOS设计的内部开发经验。实现可靠50 V平台，需要对器件进行大量内部修改，这种机会也用于整合一些内部器件设计修改，实现耐用性性能的重大改进。

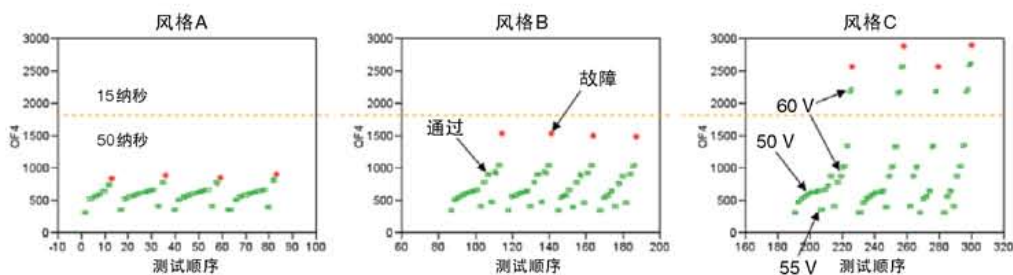


图6：MRF6V10250HS的强度故障对比器件设计

四. 设计特征

本节将讨论支持50 V RF功率器件的设计特征。RF功率、热特征、器件电阻和器件型号的讨论将关注两种类型。

第一类是支持VHF和UHF的工业、科研和医疗(ISM)频率频段。ISM应用示例包括MRI、CO2激光和等离子发生器。第二类是支持空中交通管理系统等脉冲雷达应用的L频段(20厘米)。

A. 50V ISM功率器件

飞思卡尔针对ISM频段提供八款不同50 V功率器件。这些种50 V器件的功率水平和封装风格不同。表2显示了50 V LDMOS飞思卡尔不前提供的产品。功率水平从10W到1000W不等。频率范围从10MHz到600 MHz。

产品名称	功率水平	频率	封装风格	封装类型
MRF6V2010N	10 W	10-450 MHz	TO-270-2	超模压塑料
MRF6V2150N	150 W	10-450 MHz	TO-270 WB-4	超模压塑料
MRF6V2300N	300 W	10-600 MHz	TO-270 WB-4	超模压塑料
MRF6V4300N	300 W	10-600 MHz	TO-270 WB-4	超模压塑料
MRF6VP2600H	600 W	10-250 MHz	NI-1230	气孔陶瓷
MRF6VP11KH	1000 W	10-150 MHz	NI-1230	气孔陶瓷
MRF6VP21KH	1000 W	10-235 MHz	NI-1230	气孔陶瓷
MRF6VP41KH	1000 W	10-450 MHz	NI-1230	气孔陶瓷

表2：飞思卡尔50 V ISM产品

本文描述50 V MRF6V2300N器件。该器件是一款多功能器件。其设计采用超模压塑料封装，支持300W CW，也可以用于脉冲应用。因为这是一款无以伦比的器件，VHF和UHF频段可以达到出色RF性能。表3概括地描述了飞思卡尔构建和测试的应用电路。这种电路向我们的客户展示了证明飞思卡尔的器件性能。

频率	功率	功率增益	漏极效率
27 MHz	300 W	31 dB	61%
64 MHz	300 W	28 dB	68%
88 -108 MHz	300 W	25 dB	68%
130 MHz	300 W	25 dB	70%
175 - 225 MHz	300 W	25 dB	68%
220 MHz	300 W	26 dB	68%
425 MHz	300 W	23 dB	62%
450 MHz	300 W	22 dB	60%

表3：不同频率的MRF6V2300N RF性能

B. 50 V 雷达功率器件

飞思卡尔目前拥有三款支持雷达频段的50 V产品，它们分别是MRF6V10010N、MRF6V10250HS和MRF6V14300H。MRF6V10010N采用低成本超模压塑料封装，旨在用作10W脉冲驱动器件。MRF6V10250HS采用气孔陶瓷刨床，支持末级应用的250W脉冲。MRF6V10010N和

MRF6V10250HS是支持960到1215 MHz频段的雷达器件。MRF6V14300H针对1.2到1.4 GHz频段设计，用作P3dB 330W脉冲器件。这种50 V LDMOS功率器件的性能总结显示在下面表4中。

产品名称	频率	功率水平	功率增益	漏极效率	封装风格	封装类型
MRF6V14300H	1.2-1.4 GHz	330 W	18 dB	61%	NI-780	气孔陶瓷
MRF6V10250HS	1090 MHz	250 W	21 dB	60%	NI-780S	气孔陶瓷
MRF6V10010N	1090 MHz	10 W	25 dB	69%	PLD 1.5	超模压塑料

表4：飞思卡尔50 V LDMOS雷达器件

C. 50 V 功率器件示例

正如前面描述的一样，MRF6V14300N是一种多功能器件，可以用于多种应用。该器件最好的应用示例可以在VHF TV频段(175到225 MHz)的客户电路中发现。双音操作下这种器件显示出大于23 dB的增益和大于43%的漏极效率，-30 dBc的三阶产品支持最高300 W的功率水平。我们已经成功地向众多客户展示和提供了这一应用结构。使用图7所示的简单电路主板匹配，可以实现所需性能。

图8显示了175到225 MHz应用测试。设备的宽带性能。还有一个例子，MRF6V14300H一直用于1.2~1.4 GHz L频段雷达应用。这种器件采用内部方式匹配，支持最佳性能和电阻匹配。这种器件提供高增益(P3 dB提供大于17 dB的增益)和出色漏极效率(P3 dB的漏极效率大于58%)。典型应用电路提供在下面的图9中。典型宽带性能显示在图10中。在这种测试电路中，恒定330 W的增益平坦高于0.7 dB，漏极效率平坦为2%。这种器件的出色热性能可以看到，300 μ sec脉宽的脉冲倾斜小于0.4 dB。

D. 50 V LDMOS 热性能

50 V LDMOS器件的设计一直支持目标应用的出色RF性能和出色热性能。ISM产品针对脉冲应用和CW应用做了热量优化。

图11显示了特定脉宽和占空比的MRF6VP11KH器件的最大瞬时热阻抗(MTTF)图。

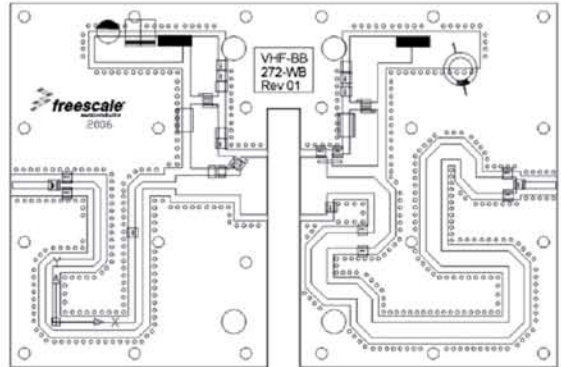


图7：MRF6V2300N VHF TV
应用电路

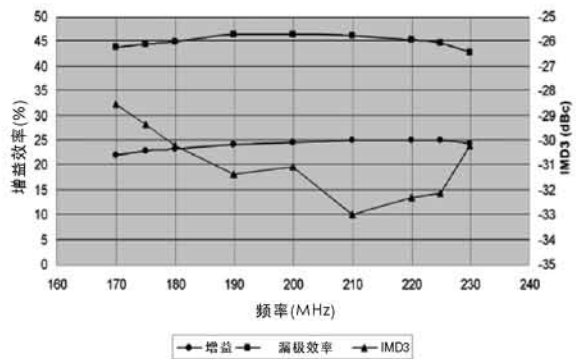


图8：MRF6V2300N VHF TV
电路性能

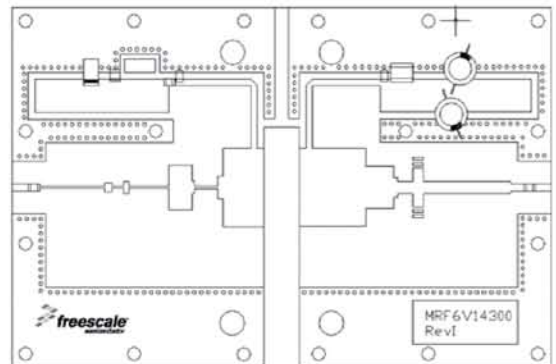


图9：MRF6V14300H
雷达应用电路

底轴显示脉宽(秒钟)，系列曲线显示三种不同占空比。作为一个示例，100 μ sec的脉宽和20%的占空比显示了0.03 $^{\circ}$ C/W的jc of 0.03 $^{\circ}$ C/W。从该曲线中，可以推算出CWjc为0.18 $^{\circ}$ C/W。

图12显示了CW条件下的MTTF对比接合温度。该曲线假设功率输出为1000 Watts CW，漏极电压为50Vdc，漏极效率为70%。作为一个示例，该曲线显示，要达到所需的RF性能(即150 $^{\circ}$ C时的性能)，MTTF大约5,000,000小时。这可能需要足够长的冷却，才能达到大约70 $^{\circ}$ C的法兰温度。

对于MRF6V14300H，热性能针对最优脉宽倾斜和RF性能做了优化。脉宽300 μ sec、占空比12%情况下，这种器件的典型脉宽倾斜是不到0.4dB。脉宽200 μ sec、占空比10%情况下，脉宽倾斜不到0.3dB。330 W、300 μ sec脉宽和12%占空比情况下，器件的热阻抗是0.13 $^{\circ}$ C/W。

E. 50V LDMOS 器件电阻

支持MRF6V2300N的各种频率的电阻测量方法显示在表5中。该表显示了无以伦比的50V LDMOS器件能够支持ISM VHF和UHF中的各种频段。该表是结构化PCB的实际电阻测量方法，针对特定频率做了优化。表6显示了脉冲晶体管的类似电阻装置。

频率	Z源(Ω)	Z负荷(Ω)
27 MHz	10.5 + j 19	3.5 + j 0.190
98 MHz	5.48 + j 2.24	3.01 + j 1.05
130 MHz	1.75 + j 3.59	3.07 + j 2.09
220 MHz	1.23 + j 3.69	2.43 + j 2.04
450 MHz	0.5 + j 1.37	1.25 + j 0.990

PCB的所有电阻测量方法

表5：MRF6V2300N
电阻对比频率

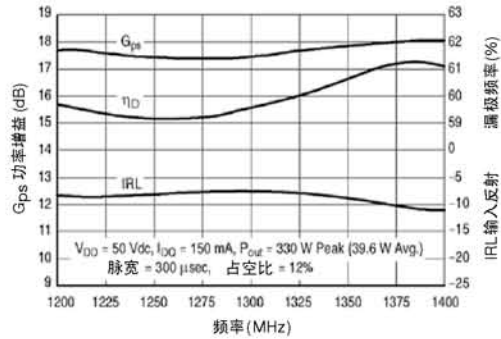


图10：MRF6V14300H
雷达电路性能

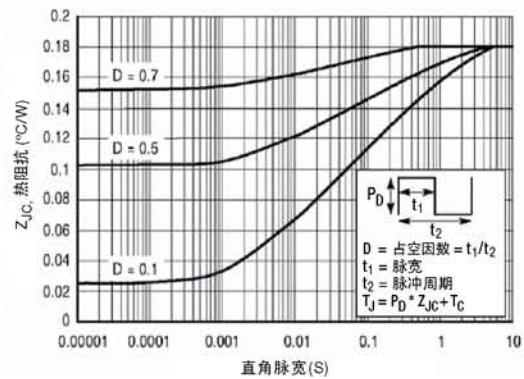


图11：最大瞬时热阻抗(MTTF)

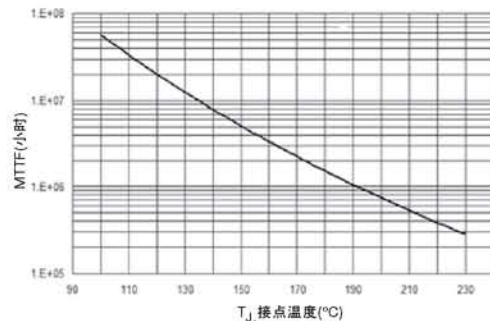


图12：MTTF
与接点温度之比较

产品名称	频率	Z源(Ω)	Z负荷(Ω)
MRF6V14300H	1400 MHz	7.01 - j 2.87	3.17 - j 1.78
MRF6V10250H	978 MHz	1.67 - j 2.04	4.30 - j 2.72
MRF6V10250H	1030 MHz	2.39 - j 2.23	5.66 - j 2.42
MRF6V10250H	1090 MHz	3.26 - j 3.72	5.85 - j 2.39
MRF6V10010N	1090 MHz	2.57 - j 7.33	14.1 - j 34.77

PCB的所有电阻测量方法

表6：雷达功率器件电阻

E. 50 V LDMOS ISM 器件型号

ISM器件的各型号现已全面上市，供客户挑选，可以和放大器设计一起使用。表7显示了目前提供的型号列表。作为一个使用飞思卡尔50V LDMOS产品型号优势的例子，图13显示了98 MHz下MRF6VP2600H的测量和模拟性能对比。该示例是支持88~108 MHz VHF FM频段的宽带测试电路。该应用电路现已面向飞思卡尔客户。表8显示了测量和模拟性能比较。

产品名称	是否供货
MRF6V2010N	是
MRF6V2150N	是
MRF6V2300N	是
MRF6V4300N	是
MRF6VP21KH	是
MRF6VP41KH	是
MRF6V14300H	是
MRF6V10010N	是

表7：支持ISM和雷达的飞思卡尔产品型号

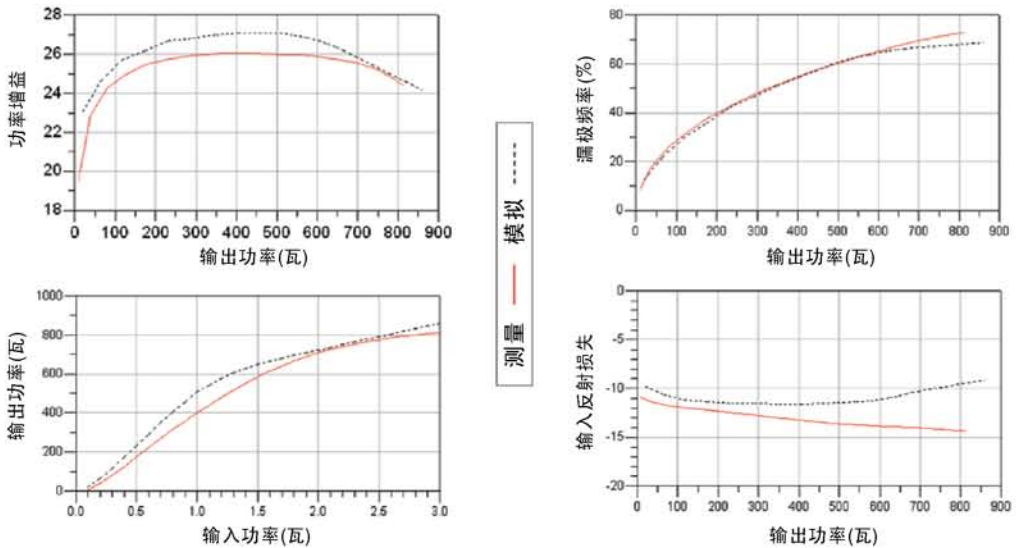


图13：MRF6VP2600H RF性能曲线，模拟对比测量

频率	功率(W)	模拟		测量	
		增益(dB)	漏极效率(%)	增益(dB)	漏极效率(%)
88 MHz	600	25.8	66.8	26.3	63.9
98 MHz	600	25.7	66.0	26.7	64.8
108 MHz	600	25	65.3	27.3	68.5

表8：MRF6VP2600H RF性能，模拟对比测量

五. 总结

飞思卡尔一直成功利用其作为全球领先的高功率RF LDMOS晶体管供应商的地位，开发、限制、制造发布一系列50V LDMOS产品，这些产品专门针对ISM、广播和雷达市场的独特需求。与这些市场的现有技术相比，飞思卡尔的50V LDMOS具有出色功率、增益、线性和效率，同时采用经济的超模压塑料封装，以突破性的价位推出产品。本文介绍了这种器件技术及其主要特性，详细说明了极大强度如何设计到这种器件中，并概述了该系列产品的设计特点。飞思卡尔致力于为RF功率市场提供引人注目的解决方案，包括飞思卡尔计划领导小组可能制定大力开发计划。

参考书目

[1-8]

- A. Wood et al. , “支持2 GHz RF功率放大器应用的高性能硅LDMOS技术” , 1996 *IEEE IEDM* , 第87-90页。
- G. Ma et al. , “支持低压无线通信的高效率LDMOS功率FET” , 1996 *IEEE IEDM* , 第91-94页。
- A. Wood , “支持PCS基站应用的120瓦特、2 GHz、Si LDMOS RF功率晶体管” , 1998 *IEEE IMS* 研讨会 , 第707-710页第二列。
- H. Brech et al. , “蜂窝和3G基站的2.1 GHz高功率RF晶体管的记录效率和增益” , 2003 *IEEE IEDM* , 第15.1.1-15.1.4页。
- C. Dragon et al. , “支持WCDMA基站应用的200 W推拉和110 W单端高性能RF-LDMOS晶体管” , 2003 *IEEE IMS* 研讨会 , 第69-72页第一列。
- W. Burger et al. , “RF-LDMOS: 支持高功率RF基础设施应用的一种器件技术” , 2004 *IEEE CSICS* , 第189-192页。
- C. Cassan, P. Gola , “支持WiMax应用的3.5 GHz 25 W硅LDMOS RFIC功率放大器” , 2007 *IEEE RFIC* 研讨会 , 第87-90页。
- X. Moronval, P. Peyrot , “支持900 MHz GSM/EDGE基站应用的业界第一个100 W二阶RFIC” , 2007 *IEEE IMS* 研讨会 , 第1585-1588页。

如何联系我们：

主页：

www.freescale.com
或 www.freescale.com/rfpower

Web 支持：

www.freescale.com/support

美国/欧洲或未列出的办事处：

Freescale Semiconductor, Inc.
Technical Information Center, EL516
2100 East Elliot Road
Tempe, Arizona 85284
+1-800-521-6274 or +1-480-768-2130
www.freescale.com/support

欧洲、中东和非洲：

Freescale Halbleiter Deutschland GmbH
Technical Information Center
Schatzbogen 7
81829 Muenchen, Germany
+44 1296 380 456 (English)
+46 8 52200080 (English)
+49 89 92103 559 (German)
+33 1 69 35 48 48 (French)
www.freescale.com/support

日本：

Freescale Semiconductor Japan Ltd.
Headquarters
ARCO Tower 15F
1-8-1, Shimo-Meguro, Meguro-ku,
Tokyo 153-0064, Japan
0120 191014
+81 3 5437 9125
support.japan@freescale.com

亚太地区：

Freescale Semiconductor China Ltd.
Exchange Building 23F
No. 118 Jianguo Road
Chaoyang District
Beijing 100022
China
+86 10 5879 8000
support.asia@freescale.com

只想取阅文章：

Freescale Semiconductor
Literature Distribution Center
P.O. Box 5405
Denver, Colorado 80217
1-800-441-2447
303-675-2140
Fax: 303-675-2150
LDCForFreescaleSemiconductor@
hibbertgroup.com

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale Semiconductor products. There are no express or implied copyright license granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits or integrated circuits based on the information in this document.

Freescale Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Freescale Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Freescale Semiconductor product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Freescale Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Freescale Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Freescale Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part.