

GaN 功率器件应用可靠性增长研究*

江元俊 王卫华 郑新

(中国电子科技集团公司第十四研究所,南京 210039)

摘要: GaN 功率器件是雷达 T/R 组件或发射功放组件中的核心元器件,随着器件的输出功率和功率密度越来越高,器件的长期可靠性成为瓶颈。文章对雷达脉冲工作条件下 GaN 功率器件的失效机理进行了分析和研究,指出高漏源过冲电压、栅源电压的稳定性以及 GaN 管芯的沟道温度的高低是影响 GaN 功率器件长期应用可靠性的主要因素,同时给出了降低漏源过冲电压、提高栅源电压稳定性以及改善 GaN 管芯的沟道温度的措施和方法。

关键词: GaN 功率器件,应用可靠性,漏源偏置电压,电压过冲,栅流,管芯结温,加速寿命试验

Research on Work Reliability of GaN Power Devices

JIANG Yuan-jun, WANG Wei-hua, ZHENG Xin

(The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China)

Abstract: GaN power devices are core devices in radar T/R modules or power amplifier modules. With the higher and higher demand on output power and power density of devices, long-term reliability becomes bottleneck gradually. In this paper, the failure mechanism of GaN power devices in radar pulse operation is analyzed and researched. High drain-source overshoot voltage, gate-source voltage stability and channel temperature of GaN transistor chip are main causes for influencing long-term work reliability of power devices. The methods of lowering the drain-source overshoot voltage, increasing the stability of gate-source voltage and improving channel temperature of GaN transistor chip are introduced.

Key words: GaN power devices, work reliability, drain-source bias-voltage, voltage overshoot, gate current, transistor chip junction-temperature, accelerated life test

引言

随着现代雷达技术的发展和武器装备需求的变化,雷达装备需要对导弹、隐身飞机、临近空间飞行器、巡航导弹和无人机等新的目标进行精密探测^[1]。上述目标都具有反射面积小、飞行高度和飞行速度变化范围大、来袭空域广等特点,给雷达预警探测系统带来极大的挑战。为了继续保证实现雷达威力等指标,对高功率固态发射机提出了更高要求,需要射频功率放大器提升输出功率。同时,舰载、机载和星载等平台对雷达的尺寸和重量提出了更严苛的要求,需要射频功率放大器具备更小的体积、重量和更高的功率密度。

GaN 功率器件具有高功率、高效率、高可靠等特点^[2],已广泛应用于各种平台和领域。为了更好地满足现代雷达及装备发展需求,需要进一步提高 GaN 射频功率器件的漏源工作电压来提升输出功率

和功率密度。但 GaN 功率器件高漏源偏置电压、高增益、高输入饱和特性、伴随高功率输出的高结温问题以及长期应用可靠性问题需要研究解决。

1 GaN 功率放大器电路设计

GaN 功率器件主要应用在雷达 T/R 组件或发射组件中,完成发射信号的放大,主要工作方式脉冲工作,追求长脉宽、高占空比和高功率。由于 T/R 组件收发分时工作,为确保接收信号不受发射大功率信号干扰,T/R 组件中用于收发切换的环形器隔离度一般小于 20 dB。功率放大器在雷达处于接收时域时,如果发射通道的功率放大器的漏极电压开启,会产生静态电流,从而产生热噪声,影响接收通道的噪声系数。为了避免发射功放加电时影响接收通道噪声系数,接收通道工作时需要关闭发射通道的漏极电压。同时 GaN 功率器件的栅压通常为负偏置,当栅压不加电而漏压加电后,GaN 功率器件的

* 收稿日期:2022-06-04;修回日期:2022-08-23

漏极静态电流会急剧增加, 从而导致功率管芯烧毁, 因此, 需要增加负压保护电路, 保证栅压未加电时漏极电压不加电。放大器电路图如图 1 所示。

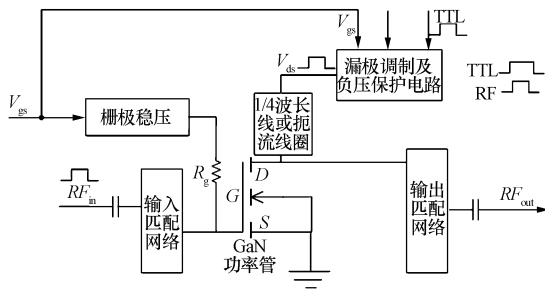


图 1 典型 GaN 功率放大器电路

GaN 功率放大器脉冲工作时, 射频调制激励信号与漏压调制信号 (V_{ds}) 同步, 且脉冲前后沿宽度比漏压调制信号略窄, 漏压调制后通过 1/4 波长线或扼流线圈后给 GaN 功率管芯的漏极加电。

GaN 功率放大器栅极电压 (V_{gs}) 与 TTL 脉冲调制信号同时输入漏极调制和负压保护电路, 才能完成漏压 V_{ds} 的输出; 栅压 V_{gs} 经过稳压后送给 GaN 功率管芯的栅极。

2 GaN 功率器件失效机理

2.1 电压过冲致器件失效机理

GaN 功率放大器在脉冲条件工作时, 为了保证不损失射频脉冲信号宽度, 一般漏极电压脉宽大于信号脉宽, 信号脉宽嵌套在漏极电压脉宽中间。在输入微波信号突然关断时, 功放的漏极电流会迅速减小, 由于偏置线存在着感抗 L_s 会阻止电流发生突变, 此时功率放大器在关断瞬间的漏极电压为^[3]:

$$U = V_{ds} + L_s (di/dt) \quad (1)$$

其中: V_{ds} 为功放正常的工作电压, di/dt 为功放漏极电流变化率, dt 在发射波形时域上表征为发射射频脉冲下降沿。GaN 功率管或芯片具有很高的射频开关速度, 上升下降沿往往能达 10 ns 以下量级。

器件正常工作时, 动态负载线在击穿电压之内。当有大的过冲电压时, 工作点电压拉高, 动态负载线达到或接近器件开态击穿点, 如图 2 所示, 当过冲电压大于器件击穿电压后将导致器件击穿烧毁。

目前 GaN 功率器件的工艺水平, 一般漏源之间的击穿电压约为 3 倍的额定工作电压 V_{ds} 。通过公式推算, 过冲电压应满足公式 (2)^[4] (V_{knee} 为功放膝点电压, GaN 膝点电压一般为 5 V 左右)。

$$U \leq (3V_{ds} + V_{knee})/2 \quad (2)$$

即便漏源过冲电压没有超过 GaN 功率器件的

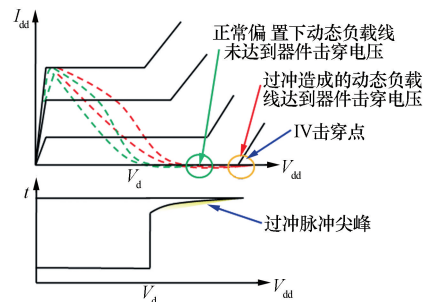
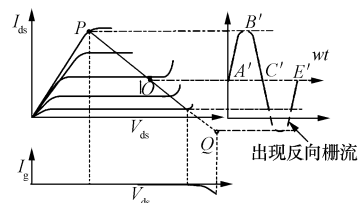


图 2 器件的输出特性曲线及动态负载线 (图中 I_{dd} 为漏极电流, V_{dd} 为漏压过冲电压, V_d 为功率管额定工作电压)

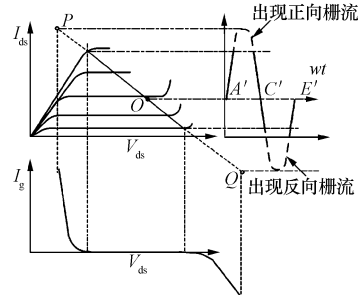
击穿电压, 也会导致 GaN 功率器件管芯漏端栅边缘的势垒层存在很高的垂直电场, 从而在该区域产生很强的拉伸力。长期工作后, 拉力超过管芯材料的承受极限时, 引起管芯晶格断裂, 导致管芯性能退化^[5], 影响长期工作可靠性。

2.2 栅流产生机理及对可靠性影响

GaN 功率管在雷达 T/R 组件发射功率放大器中的应用一般为 AB 类工作且饱和深度较高。当输入功率超过功率管的线性工作区间时便会产生栅流, 对应的栅极电压振幅、漏极电流及对应的栅极电流如图 3 所示。由于输入功率过剩, 栅电压将超过正常工作范围, 超出部分用虚线表示, 此时图 3 中的点 P 和点 Q 只表示栅电压的摆幅范围, 不代表实际的负载线。随着输入功率的增大, 刚开始出现的为负方向的栅电流, 如图 3(a) 所示。进一步增大输入功率, 正向栅电压将超过栅二极管自建电场, 此时开始出现正方向的栅电流, 如图 3(b) 所示。由于栅极电阻的存在, 栅流会导致实际加到功率管栅极的栅压发生变化, 从而引起功率管工作点的漂移和功放的不稳定。



(a) 饱和和工作状态栅流变化曲线



(b) 过饱和和工作栅流变化曲线

图 3 增大输入功率栅极电压振幅、漏极电流及栅极电流曲线

2.3 工作结温过高导致器件失效机理分析

GaN 器件在雷达中主要应用于大功率发射组件,高压、高功率、长脉宽和高占空比是其应用特点。这种应用特点导致功率管管芯会产生大量的热量,而这些热量如果不能及时耗散,则会引起器件管芯结温明显升高。

管芯结温越高,就会越快地加速管芯内部欧姆接触以及肖特基的退化、金属电极与材料的相互扩散以及表面钝化层介质的退化,影响长期工作可靠性^[5]。

另外,高温下热电子发射因为势垒高度的降低而变得更为强烈,器件的栅泄漏电流成倍增大,使得栅特性明显变差^[5],影响器件工作可靠性。

3 应用可靠性提升措施

3.1 漏极电压过冲管理

由公式(1)可知,电压过冲幅度大小与馈电电路寄生电感 L_s 以及漏极电流变化率 di/dt 相关,降低漏极电压过冲主要手段有:

首先,可以通过减小寄生电感的方式来减小漏极电压过冲。而减小寄生电感的方式主要有加粗馈电线来减小馈电电感或 1/4 波长线的电感量或在漏极调制输出端加合适容值的电容以抵消寄生电感这两种方式^[4]。加粗馈电线受到 GaN 功率管放大器高集成度制约,而选取电容器容值大小需要考虑电容器容值不影响功率管栅漏电源的加电时序,同时过大的漏极电容还会导致发射脉冲下降沿过大。

其次,可以通过减小功放漏极电流变化(di)的方式来减小漏压过冲。其主要方式为提升栅压来提高功率管的静态电流,减小微波信号关断的瞬间电流变化。这种方式会导致 GaN 功率放大器的工作效率降低,另外释放静态电流后,使得器件的增益提高导致工作稳定性下降,容易产生器件自激等问题。

第三,可以通过时域波形整形来减缓发射脉冲下降沿速度改善漏压过冲^[6]。具体说就是利用 GaN 功率放大器的漏极调制电路的输出漏压调制信号作为最终射频输出波形,射频激励脉冲波形套在脉冲调制波形的外面,如图 4 所示。

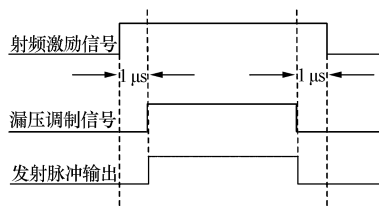
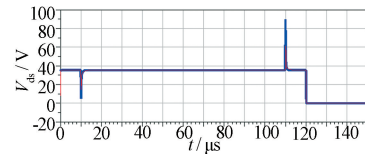


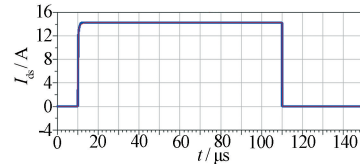
图 4 发射脉冲时序图

利用电源调制下降沿较缓的特点降低射频输出信号的开关速度,可使得 GaN 功率器件的发射射频输出信号下降沿变为 100 ns 左右。

图 5 为一款 S 波段 GaN 功率管在上升、下降沿为 10 ns 时的电压过冲仿真图,功率管的工作峰值电流为 14 A 左右,漏极电压 V_{ds} 的过冲电压达 90 V 以上。当器件的工作频率为 P 波段时,漏极馈电 1/4 波长线因电尺寸因素产生的电感量为 S 波段功率器件的好几倍,如不采取抑制过冲手段,在管芯的漏极产生的过冲电压就会明显超过 GaN 管芯的正常工作电压。



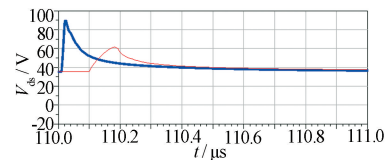
(a) 电压波形图



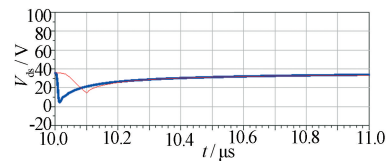
(b) 电流波形图

图 5 GaN 功率管芯漏极电流和电压在前后沿的过冲波形

当上升、下降沿变为 100 ns 时,过冲电压降为 60 V 左右,两种下降沿对应的漏压过冲幅度比较如图 6 所示。



(a) 脉冲下降沿电压过冲波形



(b) 脉冲上升沿电压过冲波形

图 6 不同信号上升下降沿下功率放大器管芯漏极电流和电压波形

3.2 栅压稳定性管理

如图 1 所示的功率放大器电路原理图,栅极加电到 GaN 功率管栅极串联有电阻 R_1 ,假设栅流为 I_g ,则 GaN 功率管栅极电压 $V_{gg} = -2.8 + R_1 \times I_g$,当出现栅流后,GaN 功率管栅极电压会偏离正常工作电压,使它的工作点发生偏移,可能偏离其稳定性范围。

一般情况下,外部电源提供给放大器中所有 GaN 功率管的栅极电压为 -5 V,而不同 GaN 功率管

的栅压有差异,因此会在 GaN 功率管的栅极电路附近增加一级栅极分压电路来调整栅压幅度大小。常用的栅极分压电路有两种:电阻分压和线性稳压器。其中电阻分压要考虑带载能力,阻值的选取要注意栅流的大小,以避免栅压被拉偏。稳压器的电流能力应在器件最大栅流范围内,并选择可提供双向栅流的稳压器,可以很好地提高栅极电压稳定性。

3.3 管芯工作结温管控

GaN 功率管管芯结温受多重因素影响,如 GaN 功率管管芯工作效率和功率密度、多管芯合成应用时的不同管芯之间的幅相平衡度、管芯衬底的热导率、功放模块的热导率、焊接材料或界面材料的热导率、冷却换热效率等。同时,在实际工程应用中需要考虑到焊接工艺中的温度梯度、导热材料的热膨胀匹配度、元器件或组件的可装配性以及可维修性等因素。

从 GaN 功率管应用层面来说,改善 GaN 功率管管芯结温的措施主要有:

1)通过管芯或匹配电路设计优化来改善结温。主要手段有:①通过提升功率放大器效率来降低热耗,改善管芯工作结温;②通过调节管芯漏极与匹配电路金丝来改善管芯内部不同管包之间热均匀性以及功率合成不同功率管芯的结温的均匀性来改善管芯结温,效果如图 7 所示。

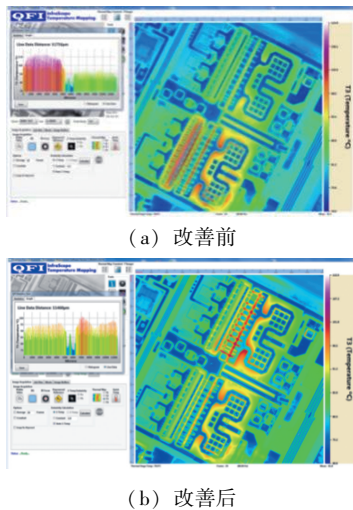


图 7 管芯的结温图

2)管芯衬底材料选择。目前主流管芯的衬底材料为 Si 和 SiC 衬底, Si 衬底材料的热导率为 $150 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, SiC 衬底的理论热导率为 $490 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,适合作为更高功率量级的 GaN 功率管芯衬底。未来随着管芯功率密度进一步提升,需要采用更高热导率材料(如金刚石材料等)作为

管芯衬底材料。金刚石热导率高达 $1350 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,能够大幅提升管芯的功率密度,改善管芯结温。

3)管芯到冷板之间接触热阻改善。影响管芯到冷板之间接触热阻大小的因素包含功率管管壳或功率载片金属载板的导热率以及功放模块外壳材料的导热率、管芯焊接材料导热率。管壳或功率载片载板的材料主要为钨铜或铜钨铜,功率放大器组装机壳考虑到热膨胀系数的匹配性,一般采用铝硅材料,但铝硅材料的导热性能相比普通铝材较差,目前也在考虑其他更高导热系数的铝合金材料如铝硅碳等。管芯与钨铜或铜钨铜管壳或载板之间的焊接手段主要有金锡焊接、高温导电胶粘接和纳米银浆粘接技术,其中金锡焊接是目前高功率情况下主流焊接手段,而高温导电胶虽然工艺简单,但导热率较低,仅适用于低功率功率管,纳米银浆粘接技术由于在高低工作结温条件下均具有较低接触热阻成为未来技术趋势。

图 8 给出了一款 S 波段 GaN 功率微组装载片在雷达 T/R 组件或功放组件中应用的导热路径图。

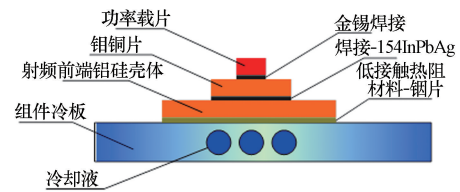


图 8 功率管芯的在工程应用中导热途径

表 1 给出了 T/R 组件或发射组件目前常用热层材料的热导率和热膨胀系数对比情况。

表 1 热沉材料的特征参数^[7]

材料	热导率/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	热膨胀系数/ ($10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)
GaN	150	5.6
SiC	490(x-y), 390(z)	4.2
铜钨铜	290(x-y), 230(z)	7.8
硅铝合金	126	11
铝合金	210	26
金锡	58	29
纳米银胶	200	20

4)液冷技术改进提高换热效能来改善 GaN 管芯结温。目前主流手段为在管芯正下方的冷板设计流道通常规冷却液。流道设计方面在热源下部的流道内嵌入矩形强化肋,利用矩形肋片增加扰动和湍流度,增大散热面积,提高冷板换热能力^[6]。冷却媒介方面,两相流技术正在成为趋势,T/R 组件或发射功放组件冷板的流道中的冷却液为液态氟利昂,

利用氟利昂局部升温后气化的特性,增加局部管芯下部温度过高区域的热传递速度来改善冷板局部温度高导致的管芯结温升高的问题。

未来,基于 SiC 衬底或金刚石衬底的片内微流散热技术将得到更多应用。该设计技术是利用衬底背面和热沉的流道相结合的方式,使热沉中的流体通过分流直接流经芯片热源区域下端的衬底,而内部流体则采用的是冷冻液,进而实现芯片近结区的高效热交换冷却的目的^[8]。

3.4 长期工作可靠性试验验证

GaN 功率器件使用寿命高达百万小时以上,元器件寿命特征的评估,采用正常应力下的长期寿命试验时间上无法实现,所以需要开展加速寿命试验来在短期内验证 GaN 功率器件的长期工作可靠性。同时还可根据加速寿命试验过程中出现的问题指导 GaN 管芯或外围电路的改进设计和管芯加工工艺改进。

GaN 功率器件加速寿命试验可分为直流应力试验和射频应力试验,由于射频应力试验更能反映功率器件在实际工作过程中的应力情况,因此一般采用加射频方式进行加速寿命试验。

另外,半导体器件的失效大多是由于器件界面状态的变化和其它物理化学因素所引起。例如表面态缺陷增加使得器件反向漏电增大,击穿电压下降;表面状态的蜕变,使场效应晶体管载流子迁移率降低;设计、材料、工艺缺陷引起性能退化等等。而物理化学反应速率与管芯工作的温度等应力相关,通常可以用化学动力学中的阿伦尼乌斯(Arrhenius)方程来表达,其形式如下:

$$dM/dt = A \exp(-E_a/KT) \quad (3)$$

式中: dM/dt 表示温度为 T 时的物质化学反应速率; E_a 称为激活能(eV),GaN 微波功率器件的激活能一般可取 $E_a = 1.6$ eV; K 是玻尔兹曼常数; A 是常数^[9]。

按以往类似器件的经验,取激活能 $E_a = 1.6$ eV,根据式(4)可推导不同温度时的加速系数 τ ^[9]:

$$\tau = e^{\frac{E_a}{k}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})} \quad (4)$$

式中: T_1 —器件正常偏置工作状态下的沟道温度; T_2 —器件高温寿命加速状态下的沟道温度,一般为器件能够达到最高工作结温 220 °C 左右。

以某 S 波段 GaN 功率放大器为例,输出功率为 250 W(峰值),可靠性预计值为 $\lambda \leq 0.8 \times 10^{-6}/h$;采取了过冲电压控制、栅压控制以及结温控制等措施后,在最大脉宽和工作比以及 70 °C 热台条件下,测

得管芯的最高结温为 145 °C。在 130 °C 热台(设备所限)通过提高功率载片的脉宽和工作比方式将管芯的最高结温提升至 220 °C(红外热像仪实测数据),算出 $\tau = 859$ 。依据 GB5080.4 中对可靠性测定试验的点估计所规定的方法,置信度 60%时器件失效率计算公式如下:

$$\lambda < \frac{X_{0.6}^2(2r+2)}{2T^*} \quad (5)$$

其中, X 为置信度符号; r 为失效数; T^* 为试验累计元件小时数。

得出累计寿命试验时间应满足: $T^*/\tau \geq 1340$ h,采用 4 只样品进行试验,单个样品平均试验时间为不少于 335 h。功率载片试验通过的判决条件为规定时间内输出功率幅度下降不超过 1 dB 即为通过试验。实际考核已达 1000 h,功率载片的输出功率满足要求,远超出其可靠性预计值。

4 结论

GaN 高功率器件的长期可靠性主要受高漏压电场应力、栅压稳定性以及热应力等因素的制约。通过对 GaN 高功率器件在脉冲应用背景下产生高漏极过冲电压产生机理分析、影响栅压稳定性机理分析以及过高管芯结温产生分析,给出了 GaN 高功率器件在实际工程应用情况下采取的管控措施以提升长期工作可靠性。对基于 GaN 高功率器件的发射功放组件设计具有参考价值。

参考文献

- [1] 张光义,王炳如. 对有源相控阵雷达的一些新要求与宽禁带半导体器件的应用[J]. 现代雷达, 2005, 27(2): 1-4
Zhang G Y, Wang B R. Some requirements for active phased array radar and application of wide bandgap semiconductor devices[J]. Modern Radar, 2005, 27(2): 1-4
- [2] 郑新. 三代半导体功率器件的特点与应用分析[J]. 现代雷达, 2008, 30(7): 12-15
Zheng X. Characteristics and application analysis of semiconductor power devices for three generations[J]. Modern Radar, 2008, 30(7): 12-15
- [3] 于兆龙,葛红娟,李尚,等. Boost 电路开关瞬间电压尖峰产生机理及抑制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(1): 198-209
Yu Z L, Ge H J, Li S, et al. Mechanism of voltage spike production during switching transients and its suppression methods in Boost converter[J]. Journal of Beijing Uni-

- versity of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(1): 198-209
- [4] 戈硕, 时晓航, 陈欣, 等. 脉冲调制模式 GaN 功放电压过冲的机理研究[J]. 微波学报, 2020, 36(S1): 252-255
Ge S, Shi X H, Chen X, et al. Mechanism research of suppressing the power amplifier switching off voltage overshoot[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(S1): 252-255
- [5] 陈伟伟. 氮化镓基高电子迁移率晶体管逆压电可靠性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016
Chen W W. Reliability investigation of GaN-based high electron mobility transistors under inverse piezoelectric effect[D]. Xi'an: Xidian University, 2016
- [6] 蒋拥军, 郑新. P 波段高功率小型化收发模块[J]. 微波学报, 2018, 34(6): 68-71
Jiang Y J, Zheng X. Miniaturized P-band high power transceiver module[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(6): 68-71
- [7] 季兴桥, 来晋明. 超高导热金刚石铜复合材料在 GaN 器件中的应用[J]. 半导体技术, 2017, 42(4): 310-314
Ji X Q, Lai J M. Application of ultrahigh thermal conductivity diamond copper composite materials on the GaN device[J]. Semiconductor Technology, 2017, 42(4): 310-314
- [8] 郭怀新, 孔月婵, 韩平, 等. GaN 功率器件芯片级热管理技术研究进展[J]. 固体电子学研究与进展, 2018, 38(5): 316-323
Guo H X, Kong Y C, Han P, et al. Progress of chip-level thermal management for GaN power devices[J]. Research & Progress of SSE, 2018, 38(5): 316-323
- [9] 任俊华, 李用兵, 刘晓峰, 等. S 波段 GaN 微波功率管脉冲射频加速寿命试验[J]. 半导体技术, 2016, 41(5): 394-397
Ren J H, Li Y B, Liu X F, et al. Pulsed RF accelerated lifetime test for S-band GaN microwave power transistor[J]. Semiconductor Technology, 2016, 41(5): 394-397
- 江元俊 男, 1978 年生, 高级工程师。主要研究方向: 固态发射及 TR 组件设计。
E-mail: 1278490653@qq.com
- 王卫华 男, 1973 年生, 研究员级高级工程师。主要研究方向: 固态发射及 TR 组件设计。
- 郑新 男, 1963 年生, 研究员级高级工程师, 集团首席专家。主要研究方向: 雷达等电子装备发射机, 功率源系统及高功率设备。
-
- (上接第 61 页)
- [2] 顾月, 官伯然. 基于平行耦合线的新型紧凑单端-平衡功分器[J]. 微波学报, 2019, 35(6): 56-60
Gu Y, Guan B R. A novel compact single-ended-to-balanced power divider based on parallel coupling line[J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(6): 56-60
- [3] Amar N Y, Ratnajit B. Balanced to unbalanced power divider with arbitrary power ratio[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26(11): 885-887
- [4] Ren X, Xu K D. Multilayer balanced-to-unbalanced power divider with wideband transmission characteristic and common mode suppression [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(1): 72-79
- [5] Zhu H, Cheng Z Q, Guo Y J. Design of wideband in-phase and out-of-phase power dividers using microstrip-to-slotline transitions and slotline resonators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(4): 1412-1424
- [6] Ma K X, Chan K T. Quasi-planar circuits with air cavities [P]. USA, WO2007149046 A1. 2007
- [7] Ma K X, Yan N N, Wang Y Q. Recent progress in SISL circuits and systems: review of passive and active circuits demonstrating SISL's low loss and self-packaging and showcasing the merits of metallic, shielded, suspended lines[J]. IEEE Microwave Magazine, 2021, 22(4): 49-71
- [8] Wang Y Q, Yu M, Ma K X. Substrate integrated suspended slot line and its application to differential coupler[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(12): 5178-5189
- [9] Li L Y, Ma K X, Meng S X. Modeling of new spiral inductor based on substrate integrated suspended line technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 65(8): 2672-2680
- 张树鹏 男, 1994 年生, 硕士生。主要研究方向: 射频微波毫米波电路与系统。
- 王勇强 (通信作者) 男, 1990 年生, 副教授, 硕士生导师, 中国电子学会高级会员, IEEE 会员, 入选第七届中国科协“青年人才托举工程”。主要研究方向: 射频微波毫米波相关的介质集成电路与系统, 高性能微波无源电路研究。共发表 SCI 论文 34 篇, 授权发明专利 15 项, 荣获学术荣誉奖项 7 项。
E-mail: wangyongqiang008@tju.edu.cn
- 马凯学 男, 1973 年生, 教授。主要研究方向: 射频微波毫米波电路与系统, 太赫兹集成电路与集成系统。