DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2017.01.002

韩江安[1]　马凯学[2]

微波高功率固态放大器技术综述

摘要

微波集成电路在民用和军用电子中起到至关重要的作用.在微波集成电路领域,高功率的功率放大器为发射机提供足够的信号功率输送到自由空间中,是其不可缺少的关键部件.基于学术研究和商用产品线情况,综述了微波功率放大器芯片的发展情况.首先讨论了各种微波毫米波功率放大器的制造技术,按照半导体器件可以归类为砷化镓、氮化镓、互补金属氧化物半导体和锗化硅等;接着讨论了微波芯片功放的设计技术用以满足高功率、宽带和高效率的指标要求;最后总结了各类微波固态功率放大器的工艺和设计技术,为芯片设计人员提供了全面的设计参考.

关键词

微波;毫米波;功率放大器;集成电路;固态电路;功率合成

中图分类号 TN722.75

文献标志码 A

收稿日期 2016-12-03

资助项目 国家自然科学基金(61471092)

作者简介

韩江安,男,博士后,主要研究方向为毫米波集成电路与系统.jiangan_han@sutd.edu.sg

马凯学(通信作者),男,教授,博士生导师,2016年国家杰出青年科学基金获得者,主要研究方向为毫米波集成电路与系统.makaixue@uestc.edu.cn

1 新加坡科技与设计大学,新加坡,487372

2 电子科技大学 物理电子学院,成都,610054

0 引言

微波集成电路技术是无线系统小型化的关键技术.在毫米波集成电路中,高性能且设计紧凑的功率放大器芯片电路是市场迫切需求的产品.总的来说,微波功率放大器的芯片性能很大程度上取决于制造工艺,而每种工艺对功率放大器有着不同的特点或优势.对于工作频率不高于100 GHz的芯片而言,砷化镓和氮化镓材料具有功率方面的优势[1-2].如果频率作为器件的首要考虑,那么选用磷化铟器件制作的功率放大器其频率可以高到500 GHz以上[3].当然,对于工业制造来说,产品的成本也是功率放大器设计以及量产的重要因素,特别是对于消费电子产品类,互补金属氧化物半导体(CMOS)利于片上系统集成,因此具有成本优势.从应用场景来看,毫米波芯片工作于不同的频率有着不同的要求,比如在Ka波段的26.5~40 GHz,目前主要用于卫星和中长距点对点通信,大功率是这个波段功率放大器的首要指标,因而氮化镓和砷化镓的功率放大器芯片是首选.对于60 GHz而言,由于电磁波在该频率的衰减很大,主要潜在应用于短距离的高速通信并面向消费电子市场,因而成本较低的CMOS半导体和锗化硅器件是未来该频段芯片设计的首选[4].在本篇综述中,首先将比较毫米波固态电路芯片制造的基础工艺;然后针对不同的设计指标,介绍了相应的解决方案,包括设计构架和功率半导体芯片的设计思路;最后比较了各种功率放大器的工艺特点和设计方法,希望能为该领域的研发工作提供直观的设计参考.

1 微波芯片制造技术

1.1 砷化镓

当前砷化镓工艺包含两大类器件工艺:赝调制掺杂异质结场效应晶体管(pHEMT)和应变高电子迁移率晶体管(mHEMT).其中pHEMT的商用程度要高于mHEMT器件.在商用领域,比较知名的公司有Qorvo、Mimixbroad、M/A-COM和Excelics等,其中大部分的固态功率放大器工作在6 GHz到120 GHz附近.比如Qorvo公司的TGA4706-FC芯片可在76~83 GHz的频率范围提供超过15 dB的增益和14 dBm的饱和输出功率.基于70 nm的pHEMT器件,砷化镓毫米波固态功率放大器已经可以工作在100 GHz的频率以上[5].非消费电子用途的主流的砷化镓功率放大器产品定位于6~40 GHz之间,以

X 波段雷达和 Ku、Ka 波段的卫星通信为目标市场.如果不采用分布式功率放大器结构,其带宽通常在 10 GHz 之内[6-7].由于衡量微波固态功率放大器的重要指标之一是饱和输出功率,Qorvo 公司的商用芯片 TGA4916 可在 29~31 GHz 的频率范围输出达到 38 dBm.在 17~30 GHz 频段,现有的 pHEMT 功率放大器的功率附加效率(PAE)集中在 25% ~ 45% 之间[8-12].

应变高电子迁移率晶体管(mHEMT)的研发初衷是为了解决磷化铟和砷化镓衬底的不匹配问题,其基本方法是在砷化镓衬底中添加一层铟.这种工艺器件具有较高的晶体管截止频率和较低的噪声,已报道的用 mHEMT 制作的毫米波功率放大器频率在 200 GHz 以上[13-14].而在低于 40 GHz 的频率,mHEMT 的功率放大器较少被报道,相较于 pHEMT 制备的功率放大器并不具备竞争优势,只有少量用于实验的低噪声放大器可供参考[15].

1.2 氮化镓

氮化镓器件具有高的电子迁移率和高的击穿电压,是高效率大功率放大器设计的首选,其工作频带范围可以从直流到接近 100 GHz.在 0.1 和 0.15 μm 特征栅长的器件问世后,多个工作频率超过 70 GHz 的氮化镓功率放大器已被验证[16-19].在低于 30 GHz 的频率,毫米波功率放大器芯片已在功率、效率和带宽方面表现出非常出众的性能.比如 ACTEL-THALES III-V 实验室研制的氮化镓功率放大器,输出功率达到 43 W 的同时保持了 52%的功率附加效率[20].而由 Mitsubishi Electric 公司研制的功率放大器可在 14~16 GHz 频带范围输出 60 W 的功率和 45%的功率附加效率[21].应用分布式放大电路拓扑,氮化镓功率放大器同时展现了其宽带和高功率的优势[22-23].由于 pHEMT 器件的商业应用已成熟多年并且优化,使得氮化镓功率放大器在 30 GHz 以上还处于与砷化镓竞争的态势.在两种器件表现出相似的输出功率时,其内部技术实现路径却稍显差异[24-27].由于氮化镓器件的高功率特性,使得用该种器件设计的功率放大电路可以用较少的晶体管进行末级合成,就能匹敌用更多砷化镓器件实现的指标.但是由于氮化镓的器件本身体积较大,需要占用较大的芯片面积,因此制作多级电路的时候往往增益不如砷化镓 pHEMT 晶体管的功率放大器.

1.3 硅基互补金属氧化物半导体

相比砷化镓和氮化镓器件,CMOS 半导体所能提供的输出功率显得非常有限.原因是该种器件的击穿电压低,并且晶体管的电流耐受能力不高,其最大优势在于容易与高集成密度、低功耗的数字模拟系统进行一体化集成,使得系统具有成本低廉、集成度高、应用范围广的优势.由于在消费电子市场的大规模应用,最近几年有关互补金属氧化物半导体的功率放大器集成的研究成为一个热点,因为当其与模拟和数字部分集成为片上系统后,在价格、可靠性和便利性上都展现出独特的优势.目前工作频率高于 15 GHz 的 CMOS 功率放大器的输出功率大体在 20 dBm 左右,并且正在向 30 dBm 推进[28].由于 CMOS 按照摩尔定律发展,在各种半导体器件中特征尺寸制程领先,因此晶体管的截止频率较高.如果辅以分布式的电路结构,其工作带宽可达几十吉赫[29-32].最近几年,由于 60 GHz 频段附近在世界大多数国家开放为不需要购买牌照就能使用的频谱资源,而且大气传播衰减大主要面向短距离通信,所以这个频段的 CMOS 功率放大器成为一个研究热点.当前该频段的功率最高水平在 20 dBm 左右,功率附加效率一般小于 25%[33-37].

1.4 锗化硅

锗化硅(SiGe)器件的发展主要由 IBM 等公司推动,采用了双极性 BiCMOS 工艺,可以作为 CMOS 的替代选择方案,同等尺度下器件的性能和截止频率都有较大幅度的提升,并且同样具有价格低廉的优点.与工作在相同频率且性能相近的 CMOS 器件比较,锗化硅异质结晶体管的比硅基互补金属氧化物半导体的耐电压,处理电流能力也稍高一筹,因而也适合用于集成微波功率放大器.在 21~26 GHz 频段,锗化硅异质结晶体管放大器可提供 23 dBm 的饱和功率输出且达到 19.8%的功率附加效率[38].有报道指出 60 GHz 频段的功率放大器的性能有所下降,当饱和输出功率在 20 dBm 时,功率附加效率值为 12.7%[39].

1.5 磷化铟

得益于磷化铟(InP)异质结晶体管的截止频率可以大于 500 GHz,这类器件非常适用于制备工作频率在 100 GHz 以上的毫米波芯片.在电路拓扑上,磷化铟固态功率放大器的拓扑大多采用多级级联、末级单管输出的方式来实现,其在 G 频段的输出功率可达 20 mW[40-42].为了进一步提高该类器件的耐压特性,双异质结结构的场效应管是其改进版本[43].当磷化铟器件应用在较低频率,比如 20 GHz 的放大

器设计,单级的放大结构就能提供62%的功率附加效率和20 dB增益[44].如果在该频段采用多路合成的方式提高输出功率,那么功率附加效率降低到37%~37.8%的区间[45-47].

2 微波高功率放大器设计技术

2.1 二进制功率合成技术

通常而言,在其他外界条件保持不变的情况下,微波功率放大器的输出功率能力与总的晶体管或场效应管的栅宽成正比.虽然理论上可以通过增加单个晶体管的方式增加输出功率,但是这种方法在实际应用中会造成匹配的困难和截止频率降低的问题,因为此时晶体管的输入输出阻抗过低.当单管不能满足微波功放的输出功率指标时,最常用的办法是采用二进制的方式来提高输出功率,比较经典的功率合成器有T字形网络和Wilkisnon功率合成器.在插入功率合成器后,放大器的效率和工作带宽会有所降低,比如文献[47]的功率放大器在多管合成的条件下其功率附加效率降为单管的一半左右.T字形网络和Wilkisnon功率合成器区别在于:T形功分网络难以满足每个端口的匹配和两个合路端的隔离,而Wilkisnon功率合成器通过在两个合路端添加电阻的方式,使所有端口达到匹配条件并事先隔离合路端口.总体而言,采用二进制方式的功率合成技术应用范围广,并且可以灵活选择需要合成的路数,因此是商用芯片中实现高功率输出的首选方式.如图1所示的TGA4916的商用芯片,在最后一级采用了32路的合路器来提高输出功率,芯片面积为3.86×5.17 mm^2,因此也可以发现二进制合路器在合成路数增加的时候版图面积也相应增加较大.

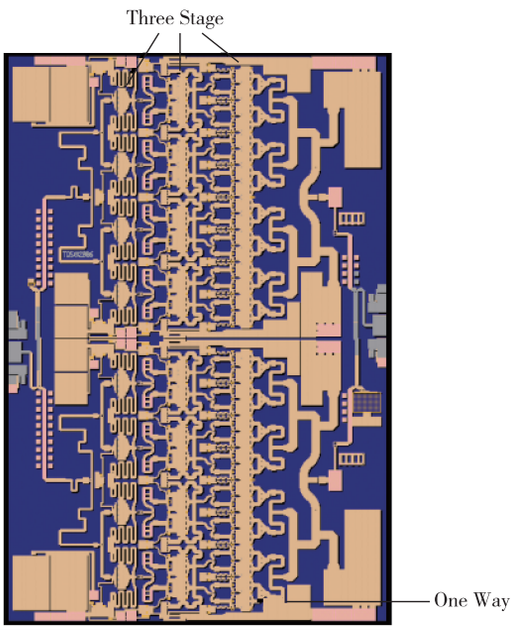


图1 TGA4916版图

Fig. 1 Layout of TGA4916

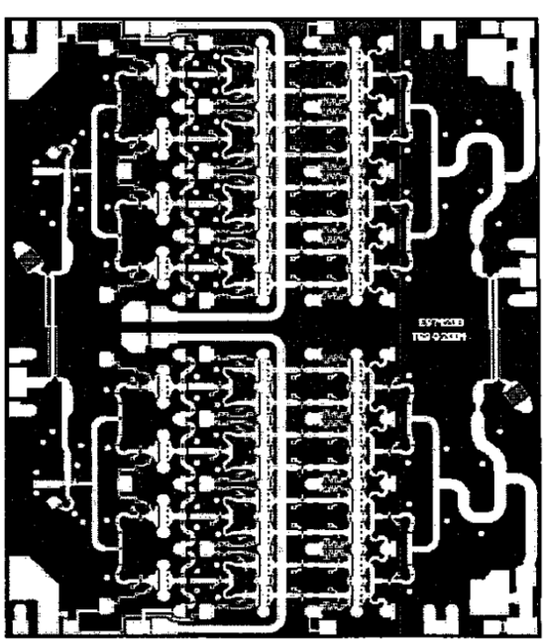


图2 39~47 GHz平衡放大器[50]

Fig. 2 39-47 GHz balanced PA [50]

2.2 平衡式放大器

对于需要工作在宽带的功率放大器而言,输入和输出端口需要在宽带内匹配到50 Ω,以实现低的驻波系数,这样可以减少连到外部元件时增益和输出功率的降低.此时可以借助90°耦合器的方式实现两个分路内的相位差,最后在合路端同向信号相加,反射波由于存在180°的相位差而被抵消[48-50].在集成电路设计中,Lange耦合器结构紧凑,能够很好满足宽带功率放大器的需求.在这类平衡功率放大器中,Lange耦合器在输入和输出端口成对使用,如图2所示.

2.3 分布式放大拓扑

分布式放大器设计的基本思路是利用具有电容特性的晶体管或场效应管,配合外部电感构造类似传输线的结构,使其整体具有传输线的特性,最终达到宽带匹配的效果.虽然这种结构可以实现覆盖多个波段的匹配效果,但其代价是所获得的增益和功率附加效率往往不高,功率合成的效果不如T形和Wilkinson功分器.但是如果行波放大拓扑配合先进

的氮化镓工艺,可以弥补其在功率和效率上的不足(图3).因此,采用氮化镓工艺设计的分布式功率放大器可以获取很多优势,这些优势包括宽带、高功率和中等PAE的性能[51-54].如文献[51]中所报道的分布式大器,饱和输出功率为38~41 dBm的连续波,并且PAE维持在19%~39%之间.

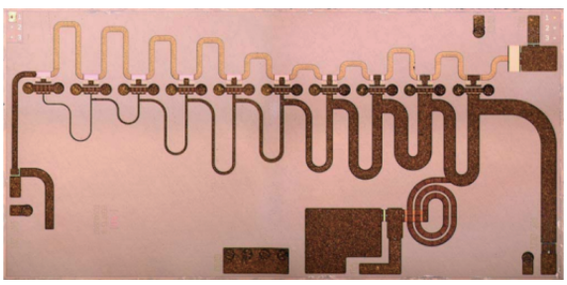


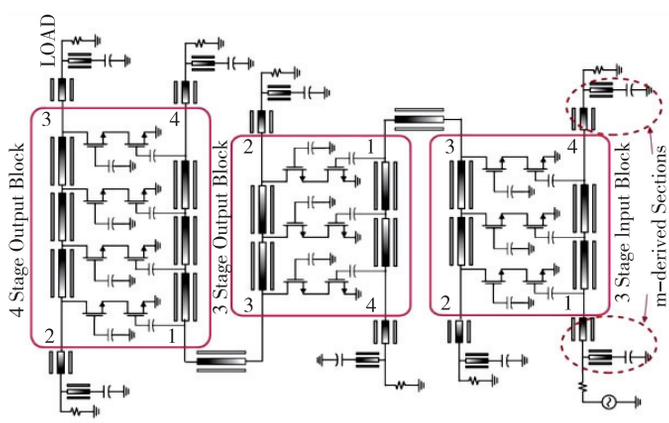
图3 氮化镓分布式放大器

Fig. 3 GaN distributed power amplifier

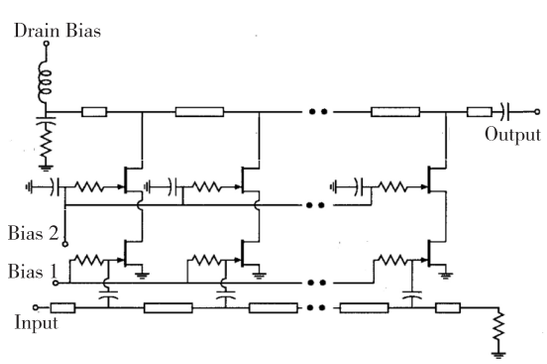
分布式放大电路拓扑与其他结构灵活组合,可以产生一系列新的放大电路形式来增强增益.比如串联式、共源共栅和矩阵式分布式放大器,如图4所示.在图4a的串联式分布式放大器,通过将3个分布式放大器级联来提高其增益和输出功率[55].图4a和4b中都采用共源共栅的连接方式提高了每个放大单元的增益.虽然这3种电路拓扑上有区别,但是本质都是通过增加放大器增益,再加上分布式放大具有的宽带的优势,来增加功率放大器总的增益带宽积.

2.4 晶体管/场效应管叠加

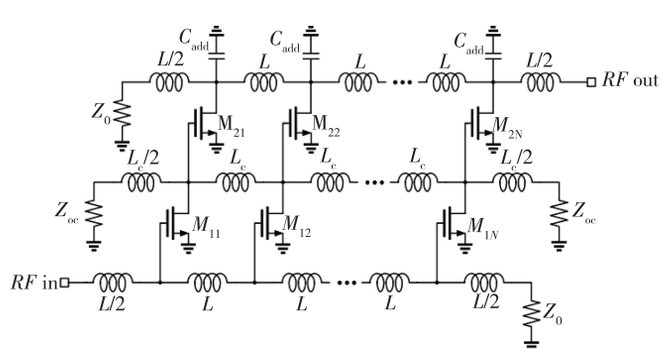
放大单元的改进也可以提高功率放大器的增益和输出功率,比如单级叠加晶体管或场效应管.虽然这种方式从电路拓扑上看类似于共源共栅,但是有两点区别:一是叠加晶体管/场效应后对电源电压的要求会相应升高,以满足支流偏置的要求,同时可以获得更高的输出功率,这种升压需要在避免器件被击穿的前提下,比如用砷化镓和氮化镓场效应管会比硅基互补金属氧化物半导体更具优势.如图5所示的电路,在场效应管叠加后漏极电压提升到了共源级电路的2倍,V_{g2}也需要相应地提高[56];二是叠加技术不仅仅局限于2个晶体管/场效应管,而是可以叠加3个以上的单元.



a. 串联式



b. 共源共栅



c. 矩阵式

图4 其他分布式放大器

Fig. 4 Other distributed power amplifier,(a) cascade,(b) cascade,and (c) matrix

使用这种晶体管/场效应管叠加技术除了提高了功率和增益以外,另外一个优势是减少了固态功率放大器芯片所需要的面积.在设计指标给定的条件下,所需要的级联的级数在采用叠加技术后会相应减少,同时减少了级间匹配的工作量,而增加的晶体管/场效应管的面积相比级间匹配电路可以忽略不计.因此很多叠加式的功率放大器往往只需要输入输出端口匹配即可,以更少的芯片面积就能实现多级功率放大器的同等指标.

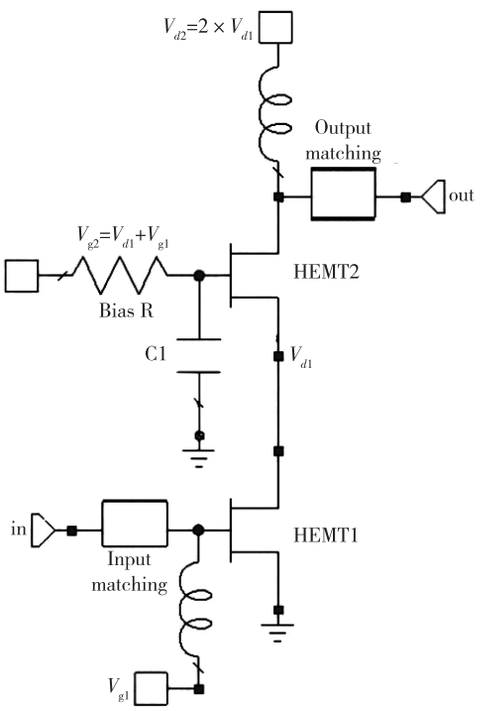


图 5　叠加场效应管拓扑

Fig. 5　Stacking FET topology

3　总结

本文首先综述了微波固态高功率放大器的实现工艺和设计方法,目的是为设计人员提供可以参考和快速选择的技术途径.从工艺选择角度考虑,需要结合功率放大器的应用场景以及器件的工艺水平.对于远距离传输比如卫星通信,砷化镓 pHEMT 和氮化镓器件具有先天的工艺优势.而对于面向消费电子的产品,锗化硅和硅基互补金属氧化物半导体固态功放可以满足片上系统的设计指标,进而降低系统的整体成本.而对于亚毫米波和太赫兹固态功放,可选用截止工作频率较高的磷化铟和砷化镓 mHEMT 器件.

然后本文介绍了各种固态功率放大器的设计技术.二进制功率合成技术是实现高功率输出固态放大器的首选,可以灵活选择合成的路数,但是电路拓扑会随着合成路数的增加而变得复杂,并且芯片面积相应增加.平衡式放大器有助于改进放大器的输入输出的宽带匹配情况,可以配合 T 形网络或者 Wilkisnon 功率合成器使用.基本的分布式放大器可实最大宽带匹配效果,但是输出功率、增益和功率附加效率不佳,可以配合先进的氮化镓工艺以及改进分布放大的电路结构来弥补这三方面的不足.晶体管/场效应管叠加技术可以实现更少的芯片面积达到多级电路的设计指标要求,但是对直流偏置电压和半导体元件本身的击穿电压要求也会相应提高.

参考文献

References

[1] Micovic M,Kurdoghlian A,Moyer H P,et al.GaN MMIC PAs for E-band (71-95 GHz) radio[C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium,2008:1-4

[2] Quay R, Tessmann A, Kiefer R, et al. Dual-gate GaN MMICs for MM-wave operation[J].IEEE Microwave & Wireless Components Letters,2011,21(2):95-97

[3] Radisic V,Deal W R,Leong K M K H,et al.A 10 mW submillimeter-wave solid-state power-amplifier module [J].IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques,2010,58(7):1903-1909

[4] Han J A,Kong Z H,Ma K X,et al.Recent progress in silicon-based millimeter-wave power amplifier[C]// IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems,2012:184-187

[5] Morgan M, Bryerton E, Karimy H, et al. Wideband medium power amplifiers using a short gate-length GaAs MMIC process [C] // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest,2009:541-544

[6] Lefebvre B,Bouw D,Lhortolary J,et al.A k-band low cost plastic packaged high linearity power amplifier with integrated ESD protection for multi-band telecom applications [C] // IEEE/MTT-S International Microwave Symposium,2007:825-828

[7] Fujii K,Morkner H.1 W power amplifier MMICs for mm-wave applications[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest,2004:1665-1668

[8] Kong K S,Nguyen B,Nayak S,et al.Ka-band MMIC high power amplifier (4 W at 30 GHz) with record compact size[C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium,2005:232-235

[9] Carroll J,Flynt R,Brown S.High efficiency K-band amplifier for on-satellite wireless communication systems [C]// IEEE Emerging Technologies Symposium:Broadband, Wireless Internet Access, 2000, DOI: 10.1109/ETS.2000.916521

[10] Brown S A,Carroll J M.Compact,1 watt,power amplifier MMICs for K-band applications[C]// 22nd Annual Gal-

lium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium, 2000:223-226
[11] Schellenberg J M.1 and 2 watt MMIC power amplifiers for commercial K Ka-band applications[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2002: 445-448
[12] Fujii K, Morkner H.Ka-band 2 W and 4 W MMIC power amplifiers in 7×7 mm low-cost SMT package[C]// IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, 2007: 829-832
[13] Kallfass I, Pahl P, Massler H, et al. A 200 GHz monolithic integrated power amplifier in metamorphic HEMT technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(6): 410-412
[14] Tessmann A, Kallfass I, Leuther A, et al. Metamorphic HEMT MMICs and modules for use in a high-bandwidth 210 GHz radar[J].IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(10): 2194-2205
[15] Whelan C S, Marsh P F, Hoke W E, et al. Millimeter-wave low-noise and high-power metamorphic HEMT amplifiers and devices on GaAs substrates[J].IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000, 35(9): 1307-1311
[16] Nakasha Y, Masuda S, Makiyama K, et al.E-band 85 mW oscillator and 1.3 W amplifier ICs using 0.12 μm GaN HEMTs for millimeter-wave transceivers[C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2010: 1-4
[17] Yoshida S, Tanomura M, Murase Y, et al.A 76 GHz GaN-on-silicon power amplifier for automotive radar systems [C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2009: 665-668
[18] Quay R, Tessmann A, Kiefer R, et al. Dual-gate GaN MMICs for MM-wave operation[J].IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(2): 95-97
[19] Micovic M, Kurdoghlian A, Shinohara K, et al. W-Band GaN MMIC with 842 mW output power at 88 GHz[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2010: 237-239
[20] Piotrowicz S, Ouarch Z, Chartier E, et al.43 W, 52% PAE X-Band AlGaN/GaN HEMTs MMIC amplifiers[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2010: 505-508
[21] Yamauchi K, Noto H, Nonomura H, et al.A 45% power-added-efficiency, Ku-band 60 W GaN power amplifier [C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2011: 1-4
[22] Campbell C, Lee C, Williams V, et al.A wideband power amplifier MMIC utilizing GaN on SiC HEMT technology [J].IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(10): 2640-2647
[23] Komiak J J, Chu K, Chao P C.Decade bandwidth 2 to 20 GHz GaN HEMT power amplifier MMICs in DFP and No FP technology[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2011: 1-4
[24] Boutros K S, Luo W B, Ma Y, et al.5 W GaN MMIC for Millimeter-wave applications[C]//IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2006: 93-95
[25] Van Heijningen M, Van Vliet F E, Quay R, et al.Design and analysis of a 34 dBm Ka-band GaN high power amplifier MMIC[C]// The 1st European Microwave Integrated Circuits Conference, 2006: 75-78
[26] Micovic M, Kurdoghlian A, Moyer H P, et al. Ka-band MMIC power amplifier in GaN HFET technology[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2004: 1653-1656
[27] Darwish A M, Boutros K, Luo B, et al.4-watt Ka-band AlGaN/GaN power amplifier MMIC[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2006: 730-733
[28] Lee J W, Kim B S. A K-band high-voltage four-way series-bias cascode power amplifier in 0.13 μm CMOS [J].IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010, 20(7): 408-410
[29] Moez K K, Elmasry M.CMOS distributed amplifiers: An integrated solution for broadband optical and wireless communication applications[C]//Second IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2005: 136-139
[30] Tsai M D, Wang H, Kuan J F, et al.A 70 GHz cascaded multi-stage distributed amplifier in 90 nm CMOS technology[C]//IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2005: 402-406
[31] Arbabian A, Niknejad A M.Design of a CMOS tapered cascaded multistage distributed amplifier[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(4): 938-947
[32] Wicks B, Skafidas E, Evans R.A 75-95 GHz wideband CMOS power amplifier[C]//European Microwave Integrated Circuit Conference, 2008: 1421-1424
[33] Kuo J L, Tsai Z M, Lin K Y, et al.A 50 to 70 GHz power amplifier using 90 nm CMOS technology[J].IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(1): 45-47
[34] Liu J Y C, Tang A, Wang N Y, et al.A V-band self-healing power amplifier with adaptive feedback bias control in 65 nm CMOS[C]//IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2011, DOI: 10.1109/RFIC.2011.5940683
[35] Jen Y N, Tsai J H, Huang T W, et al.Design and analysis of a 55-71 GHz compact and broadband distributed active transformer power amplifier in 90 nm CMOS process[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(7): 1637-1646
[36] Essing J, Mahmoudi R, Pei Y, et al.A fully integrated 60 GHz distributed transformer power amplifier in bulky CMOS 45 nm[C]//IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2011, DOI: 10.1109/RFIC.2011.5940684
[37] Pallotta A, Eyssa W, Larcher L, et al.Millimeter-wave 14 dBm CMOS power amplifier with input-output distributed transformers[C]//IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2010 DOI: 10.1109/CICC.2010.5617398
[38] Cheung T S D, Long J R.A 21-26 GHz SiGe bipolar power amplifier MMIC[J].IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(12): 2583-2597
[39] Pfeiffer U R, Goren D.A 20 dBm fully-integrated 60 GHz SiGe power amplifier with automatic level control[J].

IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 42 (7): 1455-1463
[40] Samoska L,Peralta A,Hu M,et al.A 20 mW,150 GHz InP HEMT MMIC power amplifier module[J].IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2004,14(2): 56-58
[41] Radisic V,Scott D,Wang S J,et al.235 GHz amplifier using 150 nm InP HBT high power density transistor[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011,21(6):335-337
[42] Radisic V,Deal W R,Leong K M K H,et al.A 10 mW submillimeter-wave solid-state power-amplifier module [J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2010,58(7):1903-1909
[43] Wei Y,Sundararajan K,Urteaga M,et al.40 GHz MMIC power amplifier in InP DHBT technology[C]// IEEE Lester Eastman Conference on High Performance Devices,2002:352-357
[44] Yang L W,Kobayashi K W,Steit D C,et al.High linearity K-band InP HBT power amplifier MMIC with 62.8% PAE at 21 GHz[C]//21st Annual Gallium Arsenide Integrated Circuit Symposium,1999:73-76
[45] Aust M V,Sharma A K,Gutierrez-Aitken A L.A high power and high efficiency 20 GHz InP HBT monolithic power amplifier for phased array applications[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2008:1127-1230
[46] Aust M V,Sharma A K,Chau A T,et al.A high efficiency and high linearity 20 GHz InP HBT monolithic power amplifier for phased array applications[C]//IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2007: 809-812
[47] Campbell C F,Dumka D C,Kao M Y,et al.Design and performance of a high efficiency Ka-band power amplifier MMIC[C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium,2010:1-4
[48] Mahon S J,Young A C,Fattorini A P,et al.6.5 watt,35 GHz balanced power amplifier MMIC using 6-inch GaAs pHEMT commercial technology[C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium, 2008, DOI:10.1109/CSICS.2008.47
[49] Dadello A,Fattorini A,Mahon S J,et al.44 GHz high power and driver microstrip amplifier MMICs using 6-inch 0.15 μm PHEMTs[C]//The 1st European Microwave Integrated Circuits Conference,2006:483-486
[50] Wang Q H,Kao M Y,Nayak S,et al.A high power Q-band MMIC power amplifier based on dual-recess 0.15 μm pHEMT[C]//IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium,2004:133-136
[51] Campbell C,Lee C,Williams V,et al.A wideband power amplifier MMIC utilizing GaN on SiC HEMT technology [J].IEEE Journal of Solid-State Circuits,2009,44(10): 2640-2647
[52] Komiak J J,Chu K,Chao P C.Decade bandwidth 2 to 20 GHz GaN HEMT power amplifier MMICs in DFP and No FP technology [C] // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2011, DOI: 10.1109/MWSYM.2011.5972561
[53] Masuda S,Akasegawa A,Ohki T,et al.Over 10 W C-Ku band GaN MMIC non-uniform distributed power amplifier with broadband couplers[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 2010, DOI: 10.1109/MWSYM.2010.5516208
[54] Arbabian A,Niknejad A M.Design of a CMOS tapered cascaded multistage distributed amplifier [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009,57(4):938-947
[55] Chen T Y,Chien J C,Lu L H.A 45.6 GHz matrix distributed amplifier in 0.18 nm CMOS[C]//Proceedings of the IEEE Custom Integrated Circuits Conference,2005: 119-122
[56] Darwish A M,Hung H A,Viveiros E,et al.Multi-octave GaN MMIC amplifier[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest,2010:141-144

A review of microwave high power solid state power amplifier

HAN Jiangan[1] MA Kaixue[2]
1 Singapore University of Technology and Design,Singapore 487372
2 School of Physical Electronics,University of Electronic Science and Technology of China,Chengdu 610054

Abstract Monolithic microwave integrated circuit (MMIC) has played an important role in consumer and military applications.Among MMICs,high power amplifier is indispensable and the most complex component which enable transmitter delivers signal with sufficient power into free space.This paper provides chip designers a comprehensive design references and reviews the current development status of MMIC power amplifier basing on academic reports and commercial products datasheet.Firstly,various MMIC PA fabrication technologies classified as GaAs,GaN, CMOS and SiGe etc.are discussed.Then MMIC PA design techniques for satisfying specifications like high power output,broadband and high efficiency are introduced.Finally,paper concludes the processes and design techniques for MMIC power amplifier.

Key words microwave;millimeter-wave;power amplifier;integrated circuit;solid state circuit;power combining