文章编号：2095-4980(2013)06-0836-06

110 GHz 以上固态功率放大器的发展现状

刘　杰，张　健

(中国工程物理研究院 电子工程研究所，四川 绵阳 621999)

摘　要：基于近几年的文献报道，综述了 110 GHz 以上固态功率放大器的现状和电路结构。归纳了每个固态放大器的工作频率、制作工艺、最大输出功率(P_{sat})、最大输出的压缩增益、小信号增益、1 dB 压缩点增益(P_{-1})，功率附加效率(PAE)、带宽等指标。对每个固态放大器的电路结构进行了总结，讨论了这些电路结构在太赫兹频段的应用。并根据 ITRS 的文献展望了未来固态晶体管的发展。最后讨论了未来太赫兹固态功率放大器集成到太赫兹数模系统的方式。

关键词：太赫兹；功率放大器；集成电路；InP 器件；SiGe 器件；GaAs 器件；CMOS 器件；GaN 器件

中图分类号：TN713.$^{+}$3　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201306.0836

An overview of 110 GHz and above solid-state power amplifiers and circuit topology

LIU Jie，ZHANG Jian

(Institute of Electronic Engineering，China Academy of Engineering Physics，Mianyang Sichuan 621999，China)

Abstract：An overview of 110 GHz and above solid-state integrated circuit power amplifiers and circuit topology is presented based on the latest device technologies in the past several years. The frequency, process, the maximum output power(P_{sat}), the compression gain, small signal gain, gain of 1 dB compression point(P_{-1}), power added efficiency(PAE), bandwidth of those amplifiers/power amplifiers are summarized. The circuit topologies of those amplifiers/power amplifiers and their applications in terahertz regime are discussed. The development trends of future solid-state transistor are expected according to ITRS literatures. The future technologies of integrating terahertz solid-state power amplifiers into terahertz digital-analog systems are discussed.

Key words：Terahertz；power amplifier；Integrated Circuit；InP；SiGe；GaAs；CMOS；GaN

随着人们对太赫兹系统的深入研究，太赫兹功率放大器的重要性逐渐体现出来[1-4]。本文尝试将这几年文献报道过的 110 GHz 以上固态功率放大器现状做全面的综述。传统上固态功率放大器属于 MMIC(Monolithic Microwave/Millimeter wave Integrated Circuit)，一般工作在 110 GHz 以下。随着对太赫兹波的深入研究，人们希望通过改良相对低频的 MMIC 技术，将工作频率提高到太赫兹频段，这也是研制太赫兹器件的路径之一。这种工作在太赫兹频段的 IC，人们命名为 TMIC(Terahertz Monolithic Integrated Circuit)。今天，随着对半导体材料的深入研究以及制作工艺的提高，文献报道了很多 f_t 大于 150 GHz 的晶体管，如 GaAs pHEMT/mHEMT,InPHEMT/mHEMT/HBT,SiGe HBT,CMOS 等。国外有些芯片代工厂(Foundry)已经开发出成熟的制造工艺设计包，而且在 110 GHz 以上的大小信号模型也比较准确。但这些文献报道过的太赫兹晶体管都存在功率小，增益低，效率低，线性度差的问题，这对太赫兹功率放大器的电路设计提出了挑战。本文对文献报道过的 110 GHz 以上固态功率放大器采用的电路结构进行了归纳，分析了这些电路结构给太赫兹功率放大器的电路设计带来的好处。

1　太赫兹固态功率放大器发展现状

近年来，很多国家和科研机构都重视太赫兹技术的发展。2011 年，Lorene A Samoska 发表了一篇关于工作

收稿日期：2013-09-02；**修回日期：**2013-09-27

在亚毫米波和太赫兹波频段的固态放大器的综述[5]。文中统计的功率放大器都是基于化合物半导体体系晶体管设计的。从 2011 年起至今，IEEE 出现许多新的太赫兹功率放大器的报道，其中出现了基于硅半导体体系(Si/SiGe)晶体管设计的放大器。迄今为止，还没有基于硅半导体体系晶体管设计的功率放大器的报道，但是这类放大器的有些指标不亚于化合物半导体的功率放大器，文中将这些新报道的放大器和以往报道的功率放大器做了一个归纳，同时在 Lorene A. Samoska 的文献基础上，归纳各个功率放大器指标：最大输出压缩增益、小信号增益、1 dB 压缩点增益(P_{-1})、带宽等，使太赫兹功率放大器的发展现状更加清晰。表 1 为化合物半导体功率放大器发展现状的总结，表 2 为 SiGe 半导体放大器发展现状的总结。为简化和清晰，对类似结果，只统计了最好的一个。

表 1 化合物半导体功率放大器发展现状

Table1 Current status of compound semiconductor power amplifier

f/GHz	technology	P_{sat}/dBm	P_{-1}/dBm	*PAE*/%	power density /(mW·mm^{-1})	gain/dB	compressed gain/dB	BW 3dB/GHz	reference
115	70 nm GaAs pHEMT	14	—	—	200	20	—	10	[6]
120	0.1 μm InP HEMT	14	12	6	133	9	4	30	[7]
150	0.1 μm InP HEMT	13	7	3`	66	13	8	12	[8]
184	70 nm InP HEMT	13	—	9.5	166	—	35	35	[9]
192	100 GaAs mHEMT	9	6	4	—	12.1	4	8	[10]
210	<50 nm InP HEMT	18.8	10	3.8	—	11.5	15	30	[11]
220*	<50 nm In HEMT	17	7	2.3	63	42	19	5	[12]
220	250 nm InP HBT	19.5	13	—	119	15	8.2	10	[13]
235	150 nm InP HBT	4.1	—	—	570	12.7	9.4	30	[14]
270	<50 nm InP HEMT	7.85	4.2	5.25	50	12	7	50	[15]
324	250 nm InP DHBT	1.13	-8	0.6	500	4.8	-2	—	[16]
335	<50 nm InP HEMT	3	—	—	25	12	—	20	[17]
338	50 nm InP HEMT	10	6	—	62	15	3.5	40	[18]
650	30 nm InP HEMT	2.3	0.7	—	—	10	1	80	[19]
90**	—	24.5	19	—	13.2	18	12.5	35	[20]

*The circuit structure is different.

**The power amplifier can work at 105 GHz.

表 2 硅基半导体放大器发展现状统计

Table2 Current status of Si/SiGe power amplifier

f/GHz	technology	P_{sat}/dBm	P_{-1}/dBm	*PAE*/%	gain/dB	compressed gain/dB	BW 3dB/GHz	reference
130	0.13 μm SiGe HBT	7.7	6	6.8	24.3	7	20	[21]
150	0.13 μm SiGe HBT	8.0	6	1.6	17.0	10	35	[22]
150	65 nm COMS	6.3	4	7.0	8.2	2	27	[23]

从现有的报道文献看，太赫兹放大器/功率放大器采用的是 GaAs pHEMT/mHEMT,InPHEMT/mHEMT/HBT, SiGe HBT 和 COMS。GaAs pHEMT/mHEMT 采用的是小于 70 nm 的工艺，图 1 为 Morgan 等人基于 70 nm GaAs pHEMT 工艺研制的 115 GHz 功率放大器。

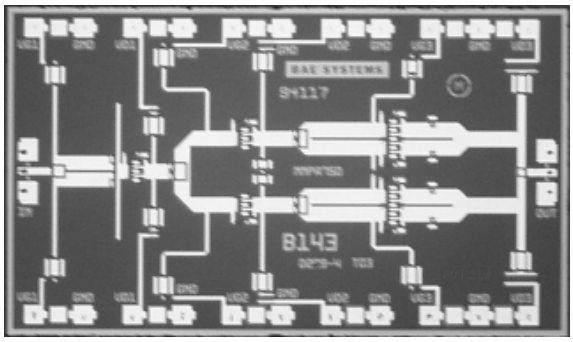


Fig.1 Photo of 115 GHz power amplifier based on 70 nm GaAs pHEMT process

图 1 基于 70 nm GaAs pHEMT 工艺的 115 GHz 功率放大器照片

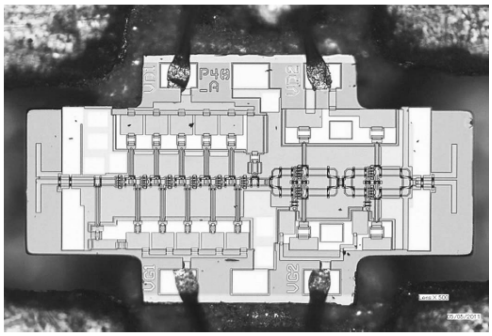


Fig.2 Photo of 650 GHz power amplifier based on 30 nm InP HEMT process

图 2 基于 30 nm InP HEMT 工艺的 650 GHz 功率放大器照片

InP HEMT/mHEMT/HBT 采用的是小于 0.1 μm 的工艺。图 2 为 Radisic 等人基于 30 nm InP HEMT 工艺研制的 650 GHz 功率放大器。SiGe HBT 采用的是小于 0.13 μm 的工艺，图 3 为 Debin Hou 等人基于 0.13 μm SiGe HBT 工艺研制的 130 GHz 放大器。CMOS 采用的是小于 65 nm 的工艺，图 4 为 Seo 等人基于 65 nm CMOS 工艺研制的 150 GHz 放大器。

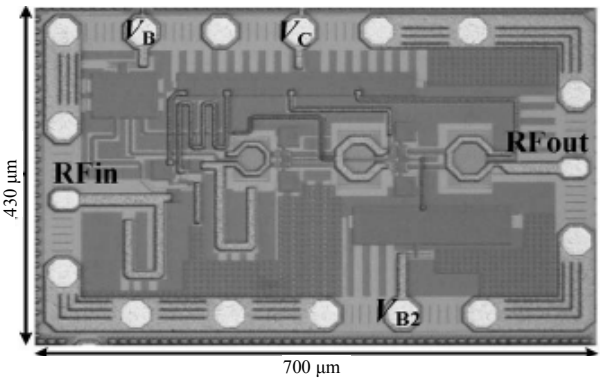


Fig.3 Photo of 130 GHz amplifier based on 0.13 μm SiGe HBT process
图 3 基于 0.13 μm SiGe HBT 工艺研制的 130 GHz 放大器照片

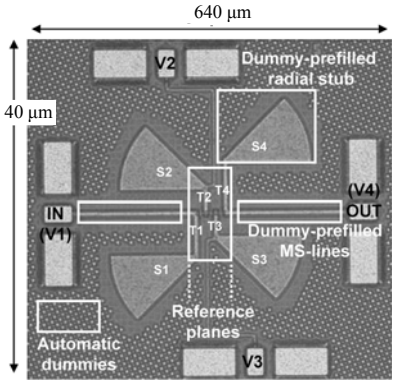


Fig.4 Photo of 150 GHz amplifier based on 65 nm CMOS process
图 4 基于 65 nm CMOS 工艺的 150 GHz 放大器照片

从表 1 和表 2 的统计来看，110 GHz 以上固态功率放大器管都存在功率小、增益低、效率低、线性度差的问题。以法国 Ommic 公司的 40 nm InP mHEMT 为例，如图 5 所示。为提高晶体管的 f_t，主要进行两方面的工艺改进，一是减小 T 栅的栅宽；二是优化材料中 In 的比例。减小 T 栅的栅宽能有效提高晶体管的 f_t，但是减小电流，降低功率的同时因材料在太赫兹波段的损耗大，导致晶体管的增益低，效率低，线性度差。这对太赫兹功率放大器的电路设计提出了挑战。

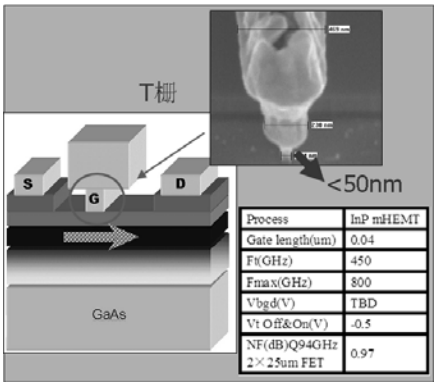


Fig.5 40 nm InP mHEMT of Ommic
图 5 法国 Ommic 公司研制的 40 nm InP mHEMT

2 太赫兹固态功率放大器

根据太赫兹晶体管的特点，在太赫兹功率放大器电路设计中，主要考虑如何提高功率、增益、效率以及线性度。表 3 统计了具有典型特点的太赫兹功率放大器电路结构。其中 CS 为共源结构，CC 为 Cascode 结构。

表 3 具有典型特点的太赫兹功率放大器的电路结构
Table3 Circuit topology of characteristic terahertz power amplifier

f/GHz	technology	topology	reference
115	70 nm GaAs pHEMT	3CS,4-way power combiners,2-way power wg combiners module	[6]
338	50 nm InP HEMT	4CC, 4-way power combiners,2-way power wg combiners module	[18]
130	0.13 μm SiGe HBT	3CC,differential	[20]

Morgan 等人研制的 115 GHz 功率放大器模块，放大器单元采用 3 级共源结构，电路采用 T 型结，通过 1 路分 2 路，再分 4 路，最后 4 路功率合成结构，模块封装采用了 4 路 Hybrid 结构进行波导功率合成。如图 2 所示，该电路采用 3 级放大结构，提高了功放的增益；4 路 T 型结结构，提高了功放芯片的最大功率输出；采用 Hybrid 结构，构造平衡式功放结构，既提高功率，又增加了输入输出端口的匹配。图 6 为组装前功率放大器模块照片。

Radisic 等人研制的 338 GHz 功率放大器模块，如图 7 所示，放大器单元采用了 Cascode 结构，电路采用了 4 级 4 路 Dolph-Chebyshev 变压器结构，模块通过片上天线，在波导进行两路空间功率合成。该模块电路采用了 4 级 Cascode 结构，提高了功放的增益；通过 4 路 Dolph-Chebyshev 变压器结构，在芯片上进行了功率合成，以及通过片上的天线，在波导进行两路空间功率合成，提高了模块的输出功率。

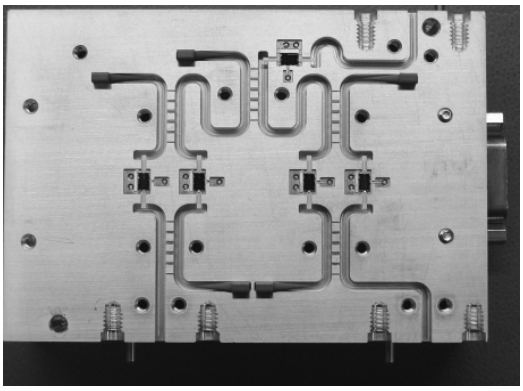
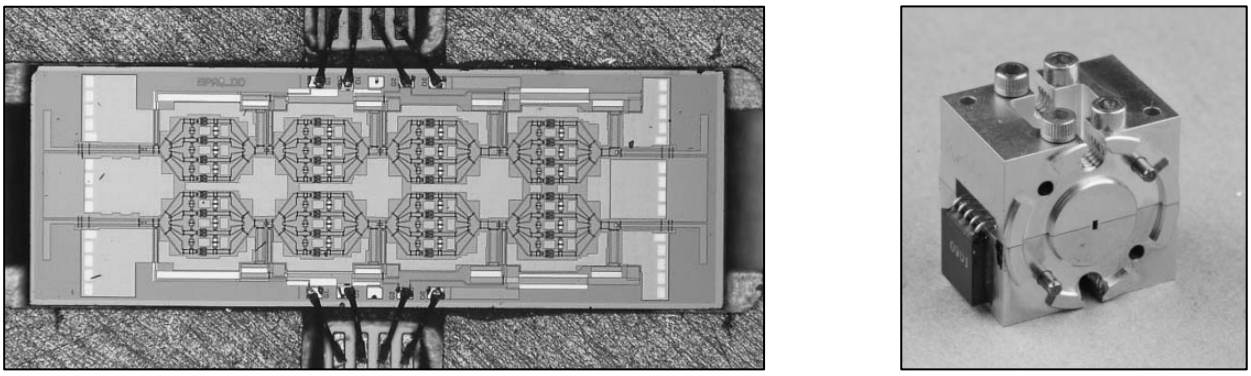


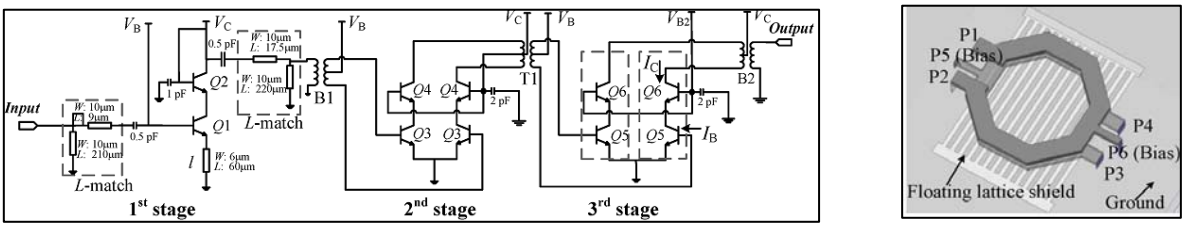
Fig.6 Photo of 115 GHz power amplifier module
图 6 115 GHz 功率放大器模块照片



(a) chip　　(b) module

Fig.7 Photo of 338 GHz power amplifier module
图 7 338 GHz 功率放大器模块

Debin Hou 等人研制的 130 GHz SiGe 放大器，放大器单元采用 Cascode 结构，第一级采用单路 Cascode 结构，第二级和第三级采用差分 Cascode 结构。设计了带有栅格结构的变压器，该变压器巧妙地将 Bulun 结构和供电网络结合在一起，有效降低了芯片输出结构的损耗，改善了功放芯片的 P_{AE}。Cascode 结构提高了放大器单元的增益，4 级结构提高功放整体芯片的增益。图 8 为 Debin Hou、熊永忠等人研制的放大器。



(a) schematic　　(b) transformer with floating lattice shield

Fig.8 Photo of 130 GHz SiGe power amplifier
图 8 130 GHz SiGe 放大器电路原理图及变压器

3　太赫兹固态功率放大器下一步的发展技术和水平的展望

未来太赫兹固态功率放大器主要朝着提高工作频率、输出功率、线性度和效率方向发展。其中提高线性度和效率可以通过电路设计进行改善，如文中第 2 节列举的一些技术。而改善晶体管的工艺，设计高性能的晶体管，才能全面提高太赫兹固态功率放大器性能。因此晶体管的 f_t 和功率密度最能表征太赫兹固态功率放大器的发展和水平。

ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)是由欧洲、日本、韩国、台湾、美国 5 个主要芯片制造地区发起的组织。该组织对太赫兹晶体管的发展进行了预估。表 4 和表 5 分别为硅基和化合物半导体器件 f_t 发展趋势和 94 GHz 频点上化合物半导体器件功率密度。

表 4 硅基和化合物半导体器件 f_t 发展趋势
Table4 Development trends of f_t based on silicon and compound semiconductor device

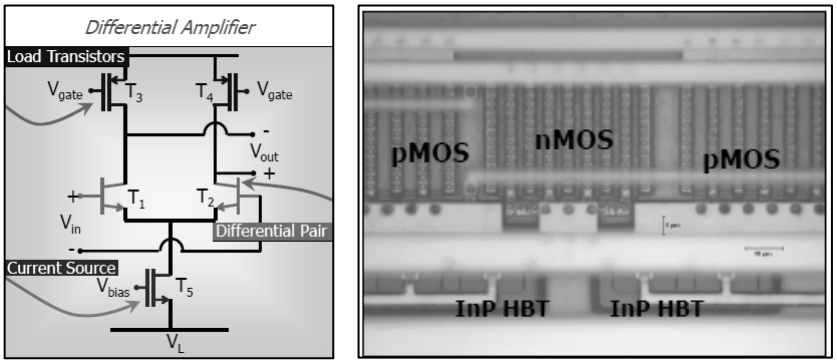
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
CMOS		620	710	795	890	994	1 137
Si BJT/ SiGe HBT	345	360	375	390	405	420	435
GaAs pHEMT	180	180					
GaAs mHEMT	500	500	700	700	700	700	
InP HEMT	350	500	500	500	700	700	700
InP HBT	320	320	400	400	400	400	560
GaN HEMT	160	200	200	200	240	240	240

表 5 化合物半导体器件功率密度(mW·mm^{-1})
(工作频率为 94 GHz)
Table5 Compound semiconductor power density(mW·mm^{-1})
(f=94 GHz)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
GaAs pHEMT	350	350					
GaAs mHEMT	300	300	350	350	350	350	
InP HEMT	300	400	400	400	400	400	400
GaN HEMT	2 200	2 500	2 500	2 500	3 000	3 000	3 000

4 太赫兹固态功率放大器在系统中的集成

太赫兹功率放大器组件只是太赫兹系统的一部分，要拓展太赫兹功放芯片应用领域，推动太赫兹系统的发展，需要开发太赫兹功率放大器在系统中的集成技术。目前这种集成技术有2个发展方向，一是太赫兹功放芯片的封装技术，一般研究比较多的是波导封装技术，如Morgan等人研制115 GHz功率放大器模块采用的微带波导过渡技术以及Radisic等人研制338 GHz功率放大器模块采用的空间功率合成技术。这是针对化合物半导体功放，无法集成在太赫兹片上数模系统中而采用的集成方式。波导封装后的太赫兹功率放大器组件只能通过波导传输线进行腔体间的集成。二是通过BiCMOS工艺。采用硅基的半导体晶体管设计太赫兹功率放大器，虽然功率上不去，但是能在硅基芯片上集成到太赫兹数模电路中，实现全硅基的太赫兹系统。美国国防部先进研究项目局中DAHI项目资助了一种全新的化合物半导体晶体管的集成技术。该集成技术的想法是，在需要化合物半导体晶体管的地方，定点制作化合物结，使得化合物半导体晶体管能直接集成到硅基的数模电路中。该项目已经完成第一阶段的研究，研制出集成了InP晶体管和CMOS晶体管的差分电路芯片，该电路具有里程碑的意义。图9为DAHI项目的电路原理图和芯片照片。



(a) schematic (b) chip

Fig.9 Schematic and photo of DAHI program
图 9 DAHI 项目的电路原理图和芯片照片

5 结论

本文对目前最先进的 110 GHz 以上固态功率放大器做了综述。将每个固态放大器的工作频率、制作工艺、最大输出功率(P_{sat})、最大输出的压缩增益、小信号增益、1 dB 压缩点增益(P_{-1})，功率附加效率(PAE)、带宽等指标归纳在表格中。对固态放大器如何解决太赫兹晶体功率小、增益低、效率低、线性度差的设计方法进行了总结，并对典型电路进行了分析。根据 ITRS 的文献展望了固态晶体管的发展，对太赫兹功率放大器在系统中的集成技术进行了简单描述，并介绍了 DAHI 项目的思想以及最新研究成果。随着越来越多的大学和科研机构加入太赫兹固态功率放大器的研究，太赫兹固态功率放大器必将得到进一步的发展和推广。

参考文献：

[1] Cooper K B,Dengler R J,Llombart N,et al. THz Imaging Radar for Standoff Personnel Screenings[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):169-182.

[2] Song Hojin,Nagatsuma T. Present and Future of Terahertz Communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):256-263.

[3] Kallfass I,Antes J,Schneider T,et al. All Active MMIC-Based Wireless Communication at 220 GHz[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(2):477-487.

[4] 金智,苏永波,张毕禅,等. InP基三端太赫兹固态电子器件和电路发展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):43-49. (JIN Zhi,SU Yong,ZHANG Bichan,et al. Development of InP-based three-terminal terahertz solid state electronic devices and circuits[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):43-49.)

[5] Samoska L A. An Overview of Solid-State Integrated Circuit Amplifiers in the Submillimeter-Wave and THz Regime[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):9-24.

[6] Morgan M,Bryerton E,Karimy H,et al. Wideband medium power amplifiers using a short gate-length GaAs MMIC process[C]// 2009 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. Boston,MA:[s.n.], 2009:541-544.

[7] Samoska L,Bryerton E,Morgan M,et al. Medium power amplifiers covering 90-130 GHz for the ALMA telescope local oscillators[C]// 2005 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., 2005:1583-1586.

[8] Samoska L,Peralta A,Hu M,et al. A 20 mW,150 GHz InP HEMT MMIC power amplifier module[J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2004,14(2):56-58.

[9] Huang P,Lai R,Grundbacher R,et al. A 20 mW G-band monolithic driver amplifier using 0.07 μm InP HEMT[J]. 2006 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.. San Francisco:[s.n.], 2006:806-809.

[10] Kallfass I,Pahl P,Massier H,et al. A 200 GHz monolithic integrated power amplifier in metamorphic HEMT technology[J]. IEEE Microw. and Wireless Compon. Lett., 2009,19(6):410-412.

[11] Radisic V,Leong K M K H,Mei X,et al. A 50 mW 220 GHz power amplifier module[C]// 2010 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Anaheim,CA:[s.n.], 2010:45-48.

[12] Radisic V,Leong K M K H,Sarkozy S,et al. A 75 mW 210 GHz power amplifier module[C]// Proc. IEEE Compound Semicond. Integr. Circuit Symp.. Waikoloa,HI:[s.n.], 2011:1-4.

[13] Reed T B,Rodwell M J W,Griffith Z,et al. 48.8 mW Multi-Cell InP HBT Amplifier with On-Wafer Power Combining at 220 GHz[C]// 2011 IEEE Compound Semicond. Integrated Circuit Symp.. Waikoloa,HI:[s.n.], 2011:1-4.

[14] Radisic V,Scott D,Sujane W,et al. 235 GHz amplifier using 150 nm InP HBT high power density transistor[J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2011,21(6):335-337.

[15] Deal W R,Mei X B,Radisic V,et al. A balanced submillimeter wave power amplifier[C]// 2008 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.. Atlanta,GA:[s.n.], 2008:399-402.

[16] Hacker J,Urteaga M,Mensam D,et al. 250 nm InP DHBT monolithic amplifiers with 4.8 dB gain at 324 GHz[C]// 2008 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.. Atlanta,GA:[s.n.], 2008:403-406.

[17] Deal W R,Mei X B,Radisic V,et al. Development of sub-millimeter-wave power amplifiers[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2007,55(12):2719-2726.

[18] Radisic V,Deal W R,Leong K. M K H,et al. A 10 mW submillimeter wave solid state power amplifier module[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2010,58(7):1903-1909.

[19] Radisic V,Leong K M K H,Mei Xiaobing,et al. Power Amplification at 0.65 THz Using InP HEMTs[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2012,60(3):724-729.

[20] HOU Debin,XIONG Yongzhong,Goh Wangling,et al. A D-Band Cascode Amplifier With 24.3 dB Gain and 7.7 dBm Output Power in 0.13 μm SiGe BiCMOS Technology[J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2012,22(4):191-193.

[21] Sarmah N,Heinemann B,Pfeiffer1 U R. A 135-170 GHz Power Amplifier in an advanced SiGe HBT technology[C]// 2013 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium(RFIC). Seattle,WA:[s.n.], 2013:287-290.

[22] Seo M,Jagannathan B,Pekarik J,et al. A 150 GHz Amplifier with 8 dB Gain and +6 dBm P_{sat} in Digital 65 nm CMOS Using Dummy-Prefilled Microstrip Lines[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2009,44(12):3410-3421.

[23] Margomenos A,Kurdoghlian A,Micovic M,et al. 70-105 GHz wideband GaN power amplifiers[J]. 2012 7th European Microwave Integrated Circuits Conference. Amsterdam:[s.n.], 2012:199-202.

作者简介:

刘　杰(1981-),男,江西省全南县人,博士,助理研究员,研究方向为毫米波和太赫兹波集成电路.email:liujie2003_2006@163.com.

张　健(1968-),男,四川省大竹县人,研究员,博士生导师,主要研究方向为电子学系统、无线电测控通信、太赫兹科学技术、集成微系统技术等.