

# Ku 波段 20W GaAs 功率 PHEMT

钟世昌<sup>†</sup> 陈堂胜

(南京电子器件研究所, 南京 210016)

**摘要:** 报道了采用介质辅助 T 型栅工艺研制的 GaAs 功率 PHEMT. 在该 T 型栅工艺中栅长和栅帽的尺寸分别进行控制, 实现了较好的工艺可控性和较高的工艺成品率. 采用该工艺制作了总栅宽为 19.2mm 的功率 PHEMT. 用两枚这种芯片合成并研制的 Ku 波段内匹配功率管在 14.0~14.5GHz 频带内, 输出功率大于 20W, 功率增益大于 6dB, 典型功率附加效率为 31%.

**关键词:** T 型栅; GaAs; PHEMT; 内匹配

**EEACC:** 2560S

**中图分类号:** TN386

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)10-1804-04

## 1 引言

GaAs 微波功率器件在相控阵雷达、微波通信系统等领域发挥着重要作用. GaAs 微波功率器件的主要结构形式有功率单片微波集成电路 (MMIC)、内匹配功率管和采用 GaAs 功率管管芯研制的功率放大模块三种结构形式. 尽管 GaAs 功率 MMIC 有体积小、一致性高等优势, 但其研制成本相对高, 更重要的是, GaAs 功率 MMIC 由于装配对芯片面积的限制, 电路的输出匹配损耗大、芯片厚度的减薄有限等原因致使其输出功率受到限制. 内匹配功率管和功率模块的形式基本相似, 所采用的 GaAs 场效应晶体管管芯 (FET) 衬底厚度可减薄至  $40\mu\text{m}$  甚至更薄, 通过多管芯的合成可以实现微波大功率输出. 同时由于匹配电路制作在陶瓷基片上, 相对于 GaAs 功率 MMIC 其功率损耗大大降低, 有利于提高器件的功率附加效率, 另外, GaAs 内匹配功率管还有研制成本上的优势. 作为微波大功率应用, 大功率 GaAs 内匹配功率管一直是众多研制和生产厂家不断发展的目标. 近些年来, 以 Fujitsu, Toshiba 等为主要代表的 GaAs 微波内匹配功率管生产厂家在不断推出输出功率更大的器件<sup>[1,2]</sup>. 建立在能带工程基础之上的 GaAs 匹配高电子迁移率晶体管 (PHEMT) 技术是目前微波、毫米波功率器件的主导型工艺技术<sup>[3~6]</sup>. 这不仅因为 GaAs 功率 PHEMT 具有微波功率特性和可靠性的综合优势, 同时还因为 GaAs 微波功率 PHEMT 从微结构外延材料的生长到器件的工艺技术都经过了多年的完善已趋于成熟. 本文首先介绍基于  $0.25\mu\text{m}$  T 型栅的 GaAs 功率 PHEMT 管芯工艺技术, 然后论述大栅

宽管芯的内匹配电路设计和实现以及研制出的 Ku 波段 GaAs 内匹配功率管的微波性能.

## 2 GaAs 功率 PHEMT 管芯工艺

研制大功率 GaAs 内匹配功率管, 大栅宽管芯的研制是核心. 本研究采用的 2 管芯合成方案充分体现了这一技术的发展趋势, 也为今后 3 管芯及 4 管芯合成实现更大的功率输出奠定了基础. 工作于 Ku 波段的 GaAs FET 的单指栅宽受到长度限制, 这也是制约工作于 Ku 波段 GaAs 功率 FET 栅宽进一步增大的主要障碍. 在 Ku 波段已报道的 GaAs 功率 PHEMT 管芯的最大栅宽为 25.2mm, 单指栅宽为  $150\mu\text{m}$ <sup>[4]</sup>, 但对比于同样结构和工艺的单指栅宽为  $100\mu\text{m}$ 、总栅宽为 16.8mm 的器件, 其功率附加效率有明显的降低<sup>[3]</sup>. 本研究设计的单管芯栅宽为 19.2mm, 共 16 个胞, 单指栅宽为  $100\mu\text{m}$ , 共 192 根栅指, 管芯的面积为  $3.6\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ . 大栅宽管芯研制的关键是多指之间均匀性的提高, 这将主要通过研制 GaAs 功率 PHEMT 的异质结材料结构的优化和器件加工工艺的优化来实现.

本研究针对工作于 Ku 波段的 GaAs PHEMT 在材料微结构优化、 $0.25\mu\text{m}$  T 型栅工艺在自停止腐蚀挖槽工艺等方法开展了深入细致的工作.  $0.25\mu\text{m}$  T 型栅工艺和挖槽工艺的均匀性和重复性是器件工艺的技术难点. 本研究采用的介质辅助 T 型栅工艺将栅长和栅帽的制作分别进行了控制, 从而实现了较好的工艺可控性和重复性. 在材料的微结构设计中引入腐蚀阻断层 (etching-stop layer), 这是解决挖槽工艺的均匀性和重复性的有

<sup>†</sup> 通信作者. Email: superwindcn@yahoo.com.cn

2006-02-19 收到, 2006-05-26 定稿

效途径.本项研制采用的是 AlAs 腐蚀阻断层,采用柠檬酸系腐蚀液对 GaAs 层进行选择腐蚀.图 1 给出了介质辅助 T 型栅工艺示意图<sup>[4]</sup>.在完成离子注入隔离、欧姆接触金属化、宽槽工艺之后,在圆片上光刻形成 0.25 $\mu\text{m}$  的阳条,如图 1(a)所示;接着采用电子束蒸发 SiO<sub>2</sub>,剥离后在 SiO<sub>2</sub> 薄膜上形成 0.25 $\mu\text{m}$  的线条,如图 1(b)所示;然后再光刻栅帽,如图 1(c)所示;最后挖槽控制电流并蒸发栅金属,剥离后完成 T 型栅的制作,如图 1(d)所示.图 2 给出了介质辅助 T 型栅功率 PHEMT 结构示意图.图 3 给出了采用上述工艺完成的 0.25 $\mu\text{m}$  T 型栅剖面图.器件工艺的另一个技术关键是钝化工艺,管芯的钝化不仅影响器件的可靠性,同时对器件的功率特性有影响.提高 SiN 介质膜的生长质量,优化钝化前的清洁处理是钝化工艺的关键.

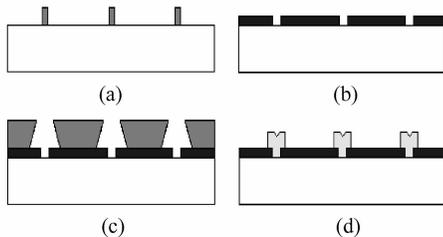


图 1 介质辅助 T 型栅工艺示意图

Fig. 1 Simplified schematic of dielectric-assisted T-shaped gate technology

S	G	D	
n <sup>+</sup> -GaAs			50nm
n <sup>-</sup> -GaAs			30nm
i-Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As			23nm
i-Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As			4nm
i-In <sub>0.18</sub> Ga <sub>0.82</sub> As			12nm
i-Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As			4nm
i-Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As			50nm
10 $\times$ Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As			18.5nm
GaAs			1.5nm
SI-GaAs			

$5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$   
 $\leftarrow$  AlAs etching-stop  
 $\leftarrow \delta$ -doping  
 $4 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$   
 $\leftarrow \delta$ -doping  
 $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$

图 2 介质辅助 T 型栅功率 PHEMT 结构示意图

Fig. 2 Simplified schematic of dielectric-assisted T-shaped gate power PHEMT

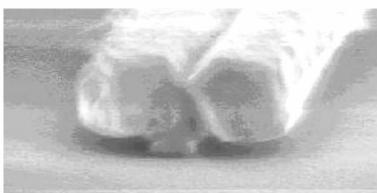


图 3 0.25 $\mu\text{m}$  T 型栅剖面图

Fig. 3 Photograph of 0.25 $\mu\text{m}$  T-shaped gate

采用上述工艺研制了 19.2mm 栅宽 GaAs 功率 PHEMT,栅长为 0.25 $\mu\text{m}$ .器件的饱和漏电流  $I_{\text{dss}}$  为 320mA/mm,栅偏置  $V_{\text{gs}} = +1\text{V}$  时的  $I_{\text{max}}$  为 520mA/mm,最大跨导为 350mS/mm,夹断电压为  $-1.2\text{V}$ ,栅漏击穿电压  $BV_{\text{gd}} > 18\text{V}$ (1mA/mm).

### 3 内匹配电路的设计与实现

通过对单胞小栅宽管芯进行负载牵引(load-pull)测量,得到其大信号负载阻抗,然后按比例推测出大栅宽管芯的输出阻抗,作为进行管芯输出端功率匹配设计的依据.采用管芯的小信号模型参数设计输入匹配电路,管芯的小信号模型将通过在片测试小栅宽管芯的  $S$  参数进行提取.图 4 为简化的 GaAs PHEMT 的电路模型,主要确定  $R_i, C_{\text{gs}}, R_{\text{ds}}$  和  $C_{\text{ds}}$  4 个参数进行输入和输出匹配电路的设计.针对本项研究的 19.2mm 栅宽的 GaAs 功率 PHEMT 管芯,最终优化出  $R_i, C_{\text{gs}}, R_{\text{ds}}$  和  $C_{\text{ds}}$  的值分别为 0.3 $\Omega, 22\text{pF}, 3\Omega$  和 3pF.

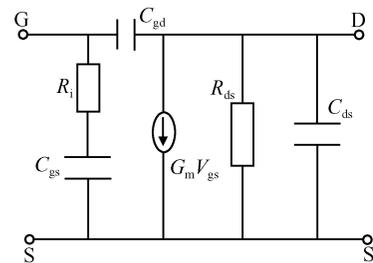


图 4 简化的 GaAs PHEMT 的电路模型

Fig. 4 Simplified equivalent circuit for GaAs PHEMT

为了确定匹配电路,先对单个 19.2mm 管芯进行匹配,所采用的电路如图 5 所示.大栅宽器件匹配很重要的一点是要保证到达管芯的功率幅度以及相位的均匀性,以避免横向谐振,所以设计电路多采用树状布局<sup>[7,8]</sup>.管芯输入端的金丝引线同时作为电感参与电路的匹配,匹配电路中的电容采用高  $Q$  值

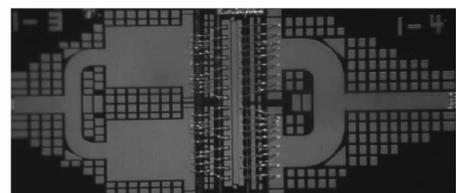


图 5 单个 19.2mm 栅宽管芯匹配电路图

Fig. 5 Circuit layout of 19.2mm

的 MOM 电容,输入输出匹配电路均制作在半绝缘 GaAs( $\epsilon_r = 12.9$ )衬底上.对两个 19.2mm 栅宽管芯进行功率合成和对单个 19.2mm 管芯进行内匹配的电路结构相似,首先将每个管芯的输出阻抗匹配

到  $10\Omega$  左右,然后再变换到  $100\Omega$ ,最后合成到  $50\Omega$ ,实际电路如图 6 所示. 这样的电路形式在 Ku 波段可以满足 600MHz 带宽要求. 最终将管芯和内匹配合成电路密封在金属微带管壳中,外型尺寸为  $21\text{mm}\times 19.2\text{mm}$ ,与国外 IB 类管壳相仿.

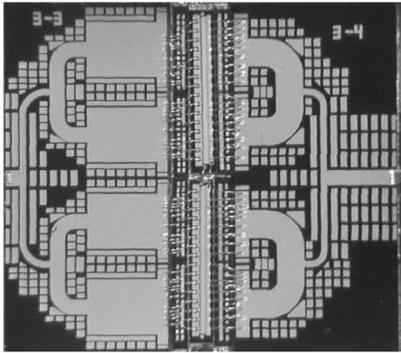


图 6 双 19.2mm 栅宽管芯合成电路图  
Fig.6 Circuit layout of  $2\times 19.2\text{mm}$

#### 4 内匹配场效应管的微波性能

要使得在 Ku 波段测试的测量值与真实值尽量接近,一个精致的测试盒必不可少. 图 7 是典型的 Ku 波段大功率测试盒偏置电路原理图. 利用该原理图做出来的测试夹具在 Ku 波段的直通差损小于 1dB.

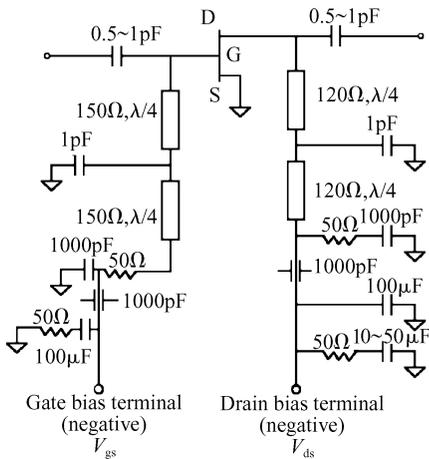


图 7 偏置电路原理图  
Fig.7 Simplified schematic of bias circuit

图 8 为一双 19.2mm 内匹配功率管在输入功率电平固定在 5W 时的输出功率和功率增益的频响曲线. 可以看出在 14.2GHz 时输出功率为 22.1W,功率增益为 6.4dB,附加效率为 31.8%;从图中还可以看出 1dB 带宽大于 600MHz. 图 9 为同一晶体管在中心频率 14.2GHz 下输出功率与输入功率之间的关系曲线. 由图可知,该晶体管的线性增益为

8.2dB,当输出功率达到 20W 时,功率增益仍然有 7dB. 图 10 为该晶体管在中心频率 14.2GHz 下的输入功率与功率附加效率之间的关系曲线.

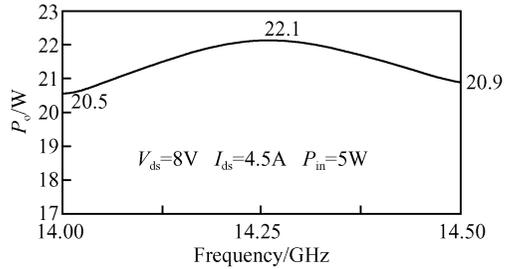


图 8 输出功率和相应的频率特性  
Fig.8 Output power versus frequency

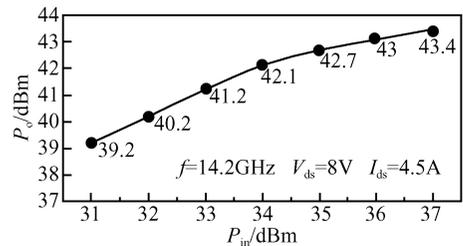


图 9 输出功率与输入功率关系图  
Fig.9 Output power versus input power

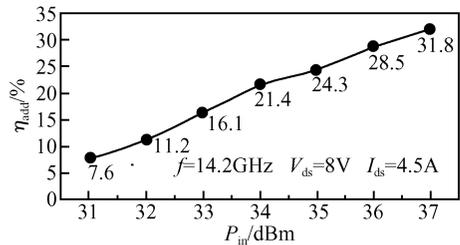


图 10 功率附加效率与输入功率关系图  
Fig.10 Power-added Efficiency versus input power

#### 5 结语

在 100mm GaAs 圆片上,采用介质辅助 T 型栅工艺研制的 GaAs 功率 PHEMT,对二芯片进行内匹配合成,研制出的 Ku 波段内匹配功率管,在 14.0~14.5GHz 带内输出功率大于 20W,功率增益大于 6dB,附加效率为 31%. 对比 2003 年东芝公司产品手册 TIM1414-20 型功率管的典型性能指标为输出功率 43dBm,功率增益 6dB,功率附加效率 26%. 在 14.0~14.5GHz 范围内,本器件研制的结果与之相当,同时本器件在均匀性、成品率、可靠性方面较好,可以小批量生产.

致谢 本器件是在南京电子器件研究所 GaAs 工程中心全体同志努力下完成的. 在器件的内匹配工作

中得到了周焕文、张斌两位教授的指点和帮助。研制过程中同张涛、唐世军、徐永刚三位工程师进行过有益的探讨,在此一并感谢。

### 参考文献

- [ 1 ] Product manual. Eudyna Devices USA Inc, 2005
- [ 2 ] Toshiba microwave semiconductor technical data, 2003
- [ 3 ] Kohji M, Yasuhiro O, Masaaki K. Ku-band 10W high efficiency HJFET power amplifier. IEEE MTT-S Digest, 1995: 335
- [ 4 ] Kohji M, Yasuhiro O, Ikuo M, et al. Ku-band 15W single-chip HJFET power amplifier. IEEE MTT-S Digest, 1996: 697
- [ 5 ] Kunii T, Yoshida N, Miyakuni S, et al. High gain and high efficiency K-band power HEMT with WSi-Au T-shaped gate. IEEE MTT-S Digest, 1997: 1187
- [ 6 ] Tkachenko Y A, Lan Y, Whitefield D S, et al. Hot-electron-induced degradation of metal-semiconductor field-effect transistors. IEEE GaAs IC Symposium, 1994: 259
- [ 7 ] Avasarala M, Day D Y S. 2.5-Watt and 5-Watt internally matched GaAs FETs for 10.7 ~ 11.7 and 14 ~ 14.5GHz bands. IEEE MTT-S Digest, 1986: 455
- [ 8 ] Walker J L B. High-power GaAs FET amplifiers. Artech House, 1992

## Ku-Band 20W GaAs Power PHEMT

Zhong Shichang<sup>†</sup> and Chen Tangsheng

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A GaAs power PHEMT with a dielectric-assisted T-shaped gate is reported. The gate length and the dimension of the gate head can be controlled in the T-shaped gate processing, and good process controllability and high yield can be achieved. GaAs power PHEMTs with a gate width of 19.2mm and Ku-band internally matched transistors with the combination of two chips are developed. The high power device demonstrates an output power of 20W with a power gain of 6dB and a typical power-added efficiency of 31% across the band of 14.0~14.5GHz.

**Key words:** T-shaped gate; GaAs; PHEMT; internal matching

**EEACC:** 2560S

**Article ID:** 0253-4177(2006)10-1804-04

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: superwindcn@yahoo.com

Received 19 February 2006, revised manuscript received 26 May 2006