

0.1 m T 型栅 PHEMT 器件

郑英奎 刘 明 和致经 吴德馨

(中国科学院微电子中心, 北京 100029)

摘要: 通过电子束和接触式曝光相结合的混合曝光方法, 并利用复合胶结构, 一次电子束曝光制作出具有 T 型栅的 PHEMT 器件, 并对 $0.1\mu\text{m}$ 栅长 PHEMT 器件的整套工艺及器件性能进行了研究。形成了一整套具有新特点的 PHEMT 器件制作工艺, 获得了良好的器件性能 ($f_t = 93.97\text{GHz}$; $g_m = 690\text{mS/mm}$)。

关键词: 二维电子气; 电子束光刻; 混合曝光; PHEMT; T 型栅

EEACC: 2560S

中图分类号: TN 386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)04-0476-05

1 引言

自从 1980 年 Mimura^[1,2] 等首先研制成功 Al-GaAs/GaAs 异质结高电子迁移率晶体管(HEMT)以来, 由于其卓越的电子输运特性, 使得此类器件和电路具有高频、高速和低噪声等特性, 并得到了快速的发展和广泛的应用。应用了赝匹配原理制作的 PHEMT 器件, 由于其材料的特殊结构所产生的二维电子气的电子输运形式有效地降低了表面噪声与热噪声的产生, 并且与 HEMT 相比, PHEMT 材料中的 InGaAs 沟道层不但有效地避免了表面缺陷和电离杂质对沟道电子的散射, 而且具有更大的电子饱和漂移速度 ($7.4 \times 10^7 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$) 和二维电子气密度, 国内制作的双 δ 掺杂材料的霍耳迁移率已达到 $5000\text{--}6000\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[3], 所以在制作超高速低噪声放大器电路方面, PHEMT 器件占有优势。

PHEMT 器件的截止频率(f_t)与栅长有直接关系, 如图 1 所示^[4], 而 f_t 与栅长的一般关系式可用下式表示^[5]:

$$f_t = \frac{v_{sat}}{2\pi L_c}$$

其中 v_{sat} 为电子平均速率; L_c 为栅长。由此可看出, 减小栅长可以有效地提高器件的频率特性。我中心于 1998 年配置了 JBX-5000LS 型电子束曝光机, 并

对深亚微米线条的电子束曝光技术进行了深入的研究。在此基础上, 我们研制了 $0.1\mu\text{m}$ 的 PHEMT 器件。

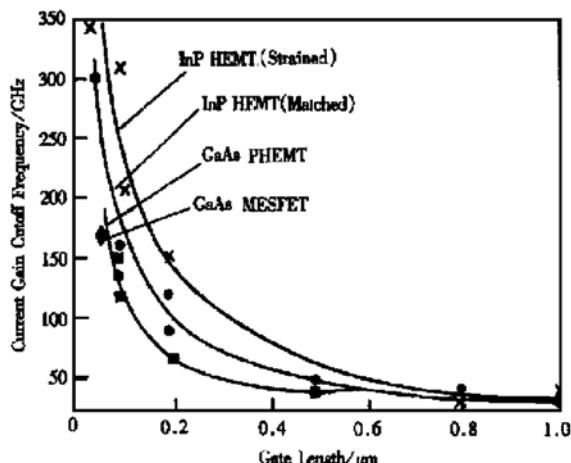


图 1 f_t 与栅长的关系

FIG. 1 f_t vs Gate Length

为了获得高增益、低噪声和高速的 PHEMT 器件, 首先要求缩小栅长, 而栅长的缩小又带来栅电阻的增加。此外, 为了达到低噪声的目的, 除了要有小的栅源间距、窄而均匀的栅条, 低的栅电阻也是重要的条件。比如对于最小噪声系数(F_{min}), 有以下关系式^[6]:

$$F_{min} = 10 \log \left(1 + k f C_{gs} \sqrt{\frac{R_g + R_s}{g_m}} \right)$$

郑英奎 男, 1973 年出生, 主要从事 PHEMT 器件的研制工作。

2000-06-10 收到, 2000-11-17 定稿

© 2001 中国电子学会

其中 k 为 Fukui 常数; f 为频率; C_{gs} 为输入栅电容 (input gate capacitance); g_m 为跨导; R_g 、 R_s 分别为栅源电阻。从这一关系式可以看出, 要获得好的噪声特性, 就要降低栅电阻 R_g 和源接触电阻 R_s 。T 型栅技术是目前比较有效的降低栅电阻的解决方法, 所以, 为了同时获得精细的栅条和比较低的栅电阻, 我们利用电子束曝光技术和复合胶工艺, 对 0.1μm 的 T 型栅进行了研究, 并能够通过一次曝光获得良好的 T 型栅线条, 而且成功地应用到了器件上。

2 器件制作

2.1 材料结构设计

PHEMT 的性能不但与器件工艺有关, 而且材料的结构直接影响器件的性能。为了获得良好的器件特性, 我们与中国科学院半导体研究所合作, 使用他们专门提供的材料, 对 0.1μm 栅长的 PHEMT 各项工艺进行了深入的研究, 并研制出了性能良好的 0.1μm 栅长的 PHEMT 器件。其典型结构如图 2 所示。

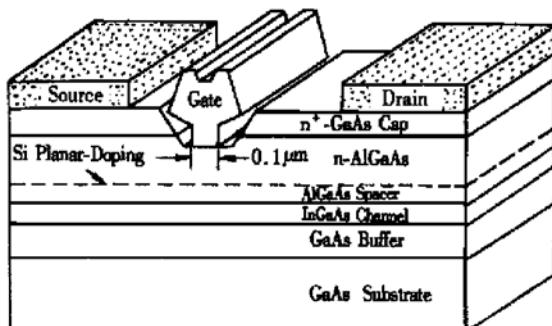


图 2 器件结构剖面图

FIG. 2 Cross-Section View of PHEMT

各层主要作用是:

半绝缘 GaAs 衬底(SI-GaAs): 晶向是(100), 电阻率为 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。

GaAs 缓冲层(Buffer): 要求足够厚。其作用是吸收生长腔的杂质及衬底向外扩散的杂质并阻止衬底的缺陷向沟道延伸, 以保证与沟道邻近的缓冲层的质量。

InGaAs 层: 二维电子气的形成层。InGaAs 材料代替 HEMT 器件中的 GaAs, 其优点是: InGaAs 层二维电子气的电子迁移率和饱和速度皆高于 GaAs。

宽带隙的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层: 作为掺杂层长在 In-GaAs 上, 其间有约 2nm 的隔离层Spacer)。

GaAs 掺杂层: 因为用带隙宽的 AlGaAs 制作欧姆接触有困难, AlGaAs 上面有一盖层(Cap)作欧姆接触用, 要求是窄带隙, 低电阻率。盖层还提供源漏连接沟道的并联回路, 降低了源漏串联电阻。这层对应栅的位置要被挖掉, 所以不能太厚, 太薄则会失去预想的作用。一般用 GaAs, 掺杂 10^{18} cm^{-3} , 厚 30—50nm。

2.2 版图设计及工艺流程

由于光学曝光技术已接近极限, 如 i 线光源(367nm)可用于制作 0.35μm 器件; 准分子激光光源(248nm/193nm)可用于制作 0.25μm/0.18μm 器件。在寻找新的极紫外光源的同时, 对于 0.1μm 线条, 曝光技术面临重大改革, 电子束曝光技术是很有竞争力的方案之一。因此, 我们在研制 0.1μm PHEMT 器件中选用 JBX-5000LS 型电子束曝光机来实现 0.1μm 栅结构。但是, 电子束曝光的效率相对于传统的光学曝光来讲过于低下, 所以, 我们采用普通接触式曝光和电子束曝光相结合的混合曝光方法, 有效地提高了工作效率, 既保证了线条和套刻精度, 又降低了操作的复杂性, 大大缩短了整个工艺周期。具体方法和版图如下:

整个工艺流程共用四块版图, 其中两块光学版和两版电子束, 如图 3 所示。

(a) 第一版小源漏用电子束直写曝光, 完成源漏与有源区的欧姆接触部分。既可以利用电子束保证形成小的源漏间距(1μm), 又可以避免使用电子束曝光形成大的压点图形而耗费大量的机时。

(b) 第二版岛版是光学版, 对第一版进行套刻, 腐蚀出有源区。这一版的套刻精度要求不是很高, 所以用光学曝光方法就可以完成。

(c) 第三版大源漏版是光学版, 形成的大源漏与小源漏搭接在一起, 并形成大的栅金属区, 用来引出栅条。这一版与第一版小源漏之间的搭接位置留有足够的余量, 允许光学套刻所引起的偏差。

(d) 第四版栅版是电子束版, 通过电子束曝光形成精细的栅条, 与第一版实现精确对准, 并在这一步完成 T 型栅的制作。

采用混合曝光方法, 使电子束曝光机时至少缩短了 70%—80%, 从而使整个工艺流程的时间大大缩短。

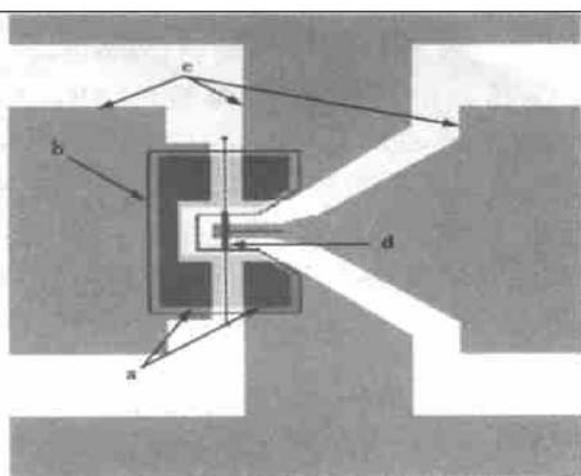


图 3 管芯局部图 (a) 第一版小源、漏-电子束版; (b) 第二版岛版-光学版; (c) 第三版大源、漏、栅-光学版; (d) 第四版栅版-电子束版

FIG. 3 Partial View of HFET (a) Mask 1: Small S-D [EBL]; (b) Mask 2: Island-Active Region; (c) Mask 3: S-D; (d) Mask 4: Gate[EBL] (EBL means Electron Beam Lithography)

2.3 工艺设计——多层金属、欧姆接触、金属搭接、T型栅

对于源漏金属的欧姆接触, 我们经过实验确定采用 Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au 的六层金属结构方案并经过退火形成了低阻、形貌平整的欧姆接触层, 如图 4 所示。

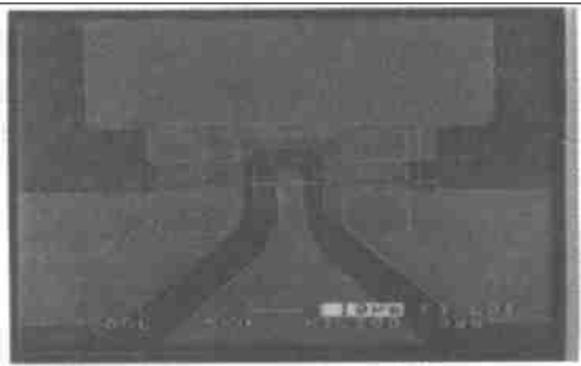


图 4 大小源漏的搭接

FIG. 4 Ohmic Contact and Metal Contact

混合曝光提高了工作效率, 但也引出了大小源漏金属和大小栅金属的搭接问题。对于源漏金属, 经过反复实验确定了 Ni/Ge/Au 三层金属的方案, 可以与 Ni/Ge/Au/Ge/Ni/Au 的六层金属结构达到良好的接触效果; 对于栅金属, 传统的 Ti/Pt/Au 栅和 Al 栅都没有引起搭接问题。

整个 PHEMT 工艺的关键技术就是栅的制作, 为了获得高的截止频率和较低的栅电阻, 我们利用电子束曝光技术和复合胶工艺(胶的材料和结构如图 5 所示), 并利用不同显影液对胶的显影速度的差别, 通过一次曝光多次显影形成了 $0.1\mu\text{m}$ 的 T 型栅, 如图 6 所示。对于传统 GaAs 器件工艺中的单层胶结构, 很难产生既深且窄的栅槽, 并通过剥离 (Lift-off) 工艺来形成低阻的细栅条。而通过复合胶工艺蒸发完成栅的制作后 (330nm 金属、 700nm 胶), 不但形成了 $0.1\mu\text{m}$ 的栅条, 而且在剥离时, 它还表现出了易于剥离的优异特点, 这对于将来深亚微米器件工艺的实用化有着深远的意义。

(1) Multi-Layer Resist Technique

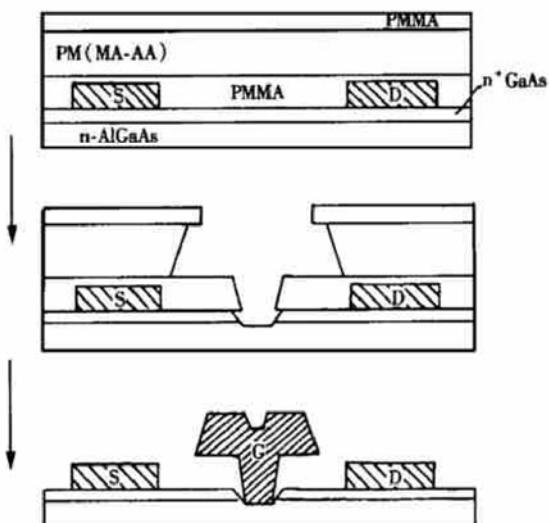


图 5 复合胶的结构和栅的形成示意图

FIG. 5 Fabrication of T-Gate



图 6 T 型栅条剖面图

FIG. 6 Cross-Section of T-Gate

3 测试结果

(1) 跨导: 性能曲线是在 HP4155 半导体参数测试仪上获得.

微分跨导: 最高值达 690mS/mm ; 典型值达 370mS/mm , 如图 7 所示.

(2) 夹断电压: $-1\text{--}1.2\text{V}$, 如图 8 所示.

(3) 截止频率: 测试仪器为 HP8510C, f_{c} 为 93.97GHz (外推), 如图 9 所示.

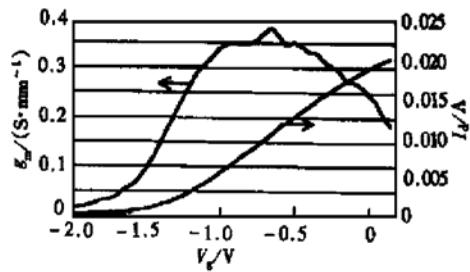


图 8 直流特性

FIG. 8 Current-Voltage Characteristics

4 结论

在以上的工作中, 利用了电子束和接触曝光混合曝光的新方法, 对 $0.1\mu\text{m}$ 的 PHEMT 器件的全套工艺过程进行了研究, 形成了一整套新的、可重复和稳定的制作深亚微米 PHEMT 器件的工艺; 对于深亚微米 T 型栅的制作, 形成了一种有效的, 可稳定重复的曝光和显影的方法, 可获得深亚微米的低栅电阻栅条, 且易于金属的剥离; 通过对新工艺的研究, 制作出的 $0.1\mu\text{m}$ PHEMT 器件, 获得了良好的器件特性, 为以后深亚微米器件及电路的研制打下基础.

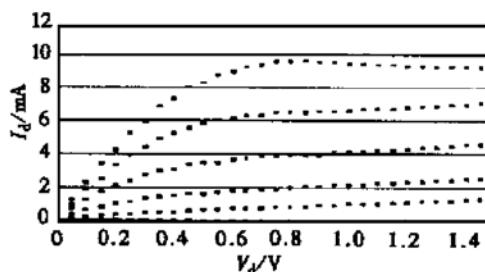


图 7 典型跨导曲线图

FIG. 7 Transfer Characteristics

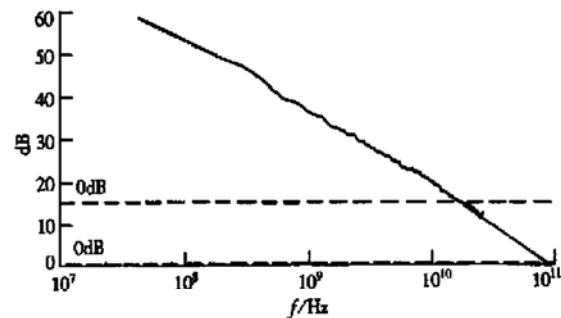


图 9 截止频率测试曲线

FIG. 9 Frequency Characteristics

参考文献

- [1] Mimura. T., Jpn. J. Appl. Phys., 1980, **19**(5): L225—L227.
- [2] Delagebeaudenf D., Electron. Lett., 1980, **16**(17): 667—668.
- [3] CAO Xin, ZENG Yi-ping, KONG Mei-ying *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21** (8): 934—936 (in Chinese).
- [4] Dimitris Pavlidis, Compound Semiconductor, 1999, 58.
- [5] R. Lee Ross, Stefan P. Svensson and Paolo Lugli, Pseudomorphic HEMT Technology and Applications, 1996, 47.
- [6] R. Lee Ross, Stefan P. Svensson and Paolo Lugli, Pseudomorphic HEMT Technology and Applications, 1996, 96.

0.1 μm T-Shaped Gate PHEMT Device

ZHENG Ying-kui, LIU Ming, HE Zhi-jing and WU De-xin

(*Laboratory of Advanced Device, Microelectronic R&D Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: PHEMT devices with T-shaped gate have been developed by using the mixed lithography—a new method combining the Electron Beam Lithography (EBL) with the normal contact lithography. The multilayer resist technique and different development are used to obtain a T-shaped gate structure. The fabrication technique and the device characteristics of the 0.1μm gate-length PHEMT have been studied, with good performance of PHEMT, 690mS/mm g_m and 93.97GHz f_T achieved.

Key word: Two Dimension Electron Gas (2DEG); Electron Beam Lithography (EBL); mixed lithography; PHEMT; T-shaped gate

EEACC: 2560S

Article ID: 0253-4177(2001)04-0476-05

ZHENG Ying-kui male, born in 1973, is engaged in the research and development of PHEMTs.

Received 10 June 2000, revised manuscript received 17 November 2000

© 2001 The Chinese Institute of Electronics