文章编号: 2095-4980(2018)01-0017-05

电子束实现 210 nm 栅长 115 GHz GaAs 基 mHEMT 器件

曾建平 ^{a,b},安 宁 ^{a,b},李志强 ^{a,b},李 倩 ^{a,b},唐海林 ^{a,b},刘海涛 ^{a,b},梁 毅 ^{a,b} (中国工程物理研究院 a.电子工程研究所,四川 绵阳 621999; b.微系统与太赫兹研究中心,四川 成都 610299)

摘要:为了获得T型栅应变高电子迁移率晶体管(mHEMT)器件,利用电子束(Electron beam, E-beam)光刻技术制备了210 nm栅长,减小mHEMT器件栅极的寄生电容和寄生电阻。采用PMMA A4/ PMMA-MMA/PMMA A2三层胶电子束直写的方法定义了210 nm栅长T型栅极。InAlAs/InGaAs异质结 GaAs-mHEMT器件的直流特性和高频特性分别通过Agilent B1500半导体参数分析仪和Agilent 360 B 矢量网络分析仪测试。直流测试结果显示,210 nm栅长InAlAs/InGaAs沟道GaAs-mHEMT单指器件的 最大有效输出跨导(gm:max)为195 mS/mm,器件最大沟道电流160 mA/mm。射频测试结果显示,电流 增益截至频率(f_r)和最高振荡频率(fmax)分别为46 GHz和115 GHz。同时欧姆电极特性和栅极漏电特性 也被表征,其中栅极最大饱和漏电流密度小于1×10⁻⁸ A/µm。

关键词: T型栅; 应变高电子迁移率晶体管; 电流增益截至频率; 最高振荡频率 中图分类号: TN322⁺.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201801.0017

210 nm T-gates of GaAs-based HEMT with f_{max}=115 GHz by one-step E-beam lithography approach

ZENG Jianping^{a,b}, AN Ning^{a,b}, LI Zhiqiang^{a,b}, LI Qian^{a,b}, TANG Hailin^{a,b}, LIU Haitao^{a,b}, LIANG Yi^{a,b} (a.Institute of Electronic Engineering, Mianyang Sichuan 621999; b.Microsystem & Terahertz Research Center, Chengdu Sichuan 610299, China Academy of Engineering Physics, China)

Abstract: A conventional tri-layer resist structure which consists of PMMA A4/PMMA-MMA/PMMA A2 is adopted to pattern the 210 nm T-gate resist profile in a single lithographic step and a single development step, in order to fabricate the T-shaped gate InAlAs/InGaAs metamorphic High Electron Mobility Transistors(mHEMTs) on a GaAs substrate. The DC and microwave performance of the device are characterized on wafer by an Agilent B1500 semiconductor parameter analyzer and an Agilent 360 B Vector Network Analyzer under room temperature, respectively. The mHEMT device shows the DC output characteristics having an extrinsic maximum transconductance $g_{m:max}$ of 195 mS/mm and the full channel current of 160 mA/mm. The cut-off frequency $f_{\rm f}$ and the maximum oscillation frequency $f_{\rm max}$ for the mHEMT device with gate width of 50 µm are 46 GHz and 115 GHz, respectively. Meanwhile, work has also been carried out to determine the quality of the Ti/Pt/Au Schottky contact to InAlAs with remarkably small gate leakage current in the order of 1×10^{-8} A/µm, which is extremely useful for the reduction of shot noise and the LNA applications.

Keywords: T-gate; mHEMT; current gain cut-off frequency; maximum oscillation frequency

高电子迁移率晶体管(HEMT)由于具有高的二维电子气(2-Dimensional Electron Gas, 2DEG)密度和高的载流子峰值 漂移速度,在高速数据传输,微波、毫米波应用领域具有巨大的潜力^[1-8]。其中,基于InAlAs/InGaAs异质结的InP基HEMT 和GaAs基mHEMT具有表面复合速率低,噪声性能好等特点,在低噪声放大应用中具有很大的优势,近年来受到研究 团队的广泛关注,取得了巨大进步^[9-16]。2011年,国际上报道了最高振荡频率(*f*_{max})超过1.2 THz的亚50 nm栅长InP基 HEMT器件,该结果为当时最好水平^[13]。2014年,InP基HEMT器件的最高振荡频率超过了1.4 THz^[14]。2015年,基于InP 基HEMT的放大器电路工作频率首次接近1 THz^[15]。虽然InP基HEMT的InAlAs/InGaAs异质结中,InGaAs沟道层的In组 分可以超过60%,可实现更高的电子迁移率和二维电子气密度,器件的直流和高频性能也更为优越。但InP衬底较脆易 碎,工艺加工难度大,导致芯片尺寸受限制,难以批量化大规模生产以及成本昂贵等问题,限制了InP基HEMT的商业 化应用。GaAs基mHEMT利用半绝缘GaAs衬底生长InP基InAlAs/InGaAs异质结HEMT外延结构,通过In组分渐变的缓冲 层减缓GaAs衬底与外延结构之间的应力,兼具InP基HEMT优越的器件性能和成熟的低成本GaAs大尺寸芯片加工工艺 的优点,在微波毫米波频率范围的低噪声和高功率应用领域有着重要的商业化应用价值。ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)指出GaAs基mHEMT在室温下噪声性能已优于InP基pHEMT(pseudomorphic HEMT)器件^[16]。 目前, mHEMT器件最大电流增益截至频率(f_T)也已经超过0.66 THz^[16]。

本文中,利用电子束光刻技术制备了210 nm栅长T型栅、50 µm栅宽的In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.4}Ga_{0.6}As异质结GaAs-mHEMT 单指器件。采用非退火欧姆接触技术实现良好边缘形貌的欧姆接触电极,通过优化PMMA A4/PMMA-MMA/PMMA A2 三层胶结构的电子束曝光剂量和显影条件实现了210 nm栅长T型栅,并测试了mHEMT单指器件的直流特性和高频特 性。器件的最大有效输出跨导(gm:max)和最大沟道电流分别为195 mS/mm和160 mA/mm。电流增益截至频率(fr)和最高振 荡频率(fmax)分别为46 GHz和115 GHz。同时,还表征了欧姆接触特性和栅极漏电特性,其中栅极最大饱和漏电流密度 小于1×10⁻⁸ A/µm。

器件结构 1

In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.4}Ga_{0.6}As异质结HEMT外延结构生长在3 in半绝缘(100)GaAs衬底上。从下往上, 3 in半绝缘GaAs衬 底上依次为一定厚度的i-InAlAs组分渐变应变缓冲层,300 nm厚的i-In_{0.4}Al_{0.6}As背势垒层,18 nm的i-In_{0.6}Ga_{0.4}As沟道层, 3 nm的In_{0.4}Al_{0.6}As空间隔离层, 12 nm的In_{0.4}Al_{0.6}As肖特基势垒层, 15 nm的i-In_{0.4}Ga_{0.6}As层和20 nm的Si掺杂帽层。其中, Si基delta平面掺杂层位于In_{0.4}Al_{0.6}As空间隔离层和In_{0.4}Al_{0.6}As肖特基势垒层之间,以确保沟道中有高面密度的二维电子 气。该In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.4}Ga_{0.6}As异质结GaAs-mHEMT外延结构的二维电子气面密度为3.5×10¹² cm⁻²,沟道电子迁移率室 温下超过8 700 cm²·V⁻¹·s⁻¹。

2 器件制作

图1给出了In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.4}Ga_{0.6}As异质结 GaAs-mHEMT器件的截面结构示意图。器件制 作过程采用了常规光刻和电子束光刻2种技术。 源漏欧姆电极间距为3 μm。T型栅电极位于沟道 中间位置,距离源漏欧姆电极均为1.5 μm。T型 栅的栅长为210 nm, 栅宽50 μm。整个器件制作 工艺过程如下: 首先进行器件隔离, 利用磷酸 基溶液(H₃PO₄:H₂O₂:H₂O)湿法化学腐蚀方法腐 蚀外延结构直至i-In_{0.4}Al_{0.6}As背势垒层。经扫描 电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM) 测试,腐蚀深度约110 nm。然后,利用Suss

1.5 µm 1.5 µm drain source 20 nm n - In_{0.4}Ga_{0.6}As 20 nm n -Ino 4Gao 6As 15 nm i-In_{0.4}Ga_{0.6}As 15 nm i-In0.4Ga0.6As with delta-doping 18 nm i-In_{0.6}Ga_{0.4}As 300 nm i-In_{0.4}Al_{0.6}As i-InAlAs buffer S.I. GaAs substrate

T-gate

Fig.1 Schematic cross section of the In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.4}Ga_{0.6}As mHEMT 图1 In0.4Al0.6As/In0.4Ga0.6As异质结GaAs基mHEMT器件的截面结构示意图

MA6/BA6光刻机定义源漏欧姆电极,其中源漏欧姆电极间距为 3μm。采用溅射的方式制作非退火欧姆接触金属Pt/Ti/Pt/Au,各 层厚度分别为8 nm/15 nm/15 nm/120 nm。利用传输线模型 (Transmission Line Model, TLM)获得源漏电极的欧姆接触电阻 率为3.51×10⁻⁵ Ω·cm⁻²。

栅极工艺是HEMT器件制备中最重要的步骤,涉及栅极光 刻、槽栅刻蚀、金属化工艺等。本文中利用日本电子JBX-5500 电子束光刻设备(加速电压50 kV, 电流100 pA)分2步完成槽栅刻 蚀和T型栅的电子束光刻工艺。器件的槽栅工艺采用宽槽栅方法 实现,首先利用聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethylmethacrylate, PMMA)A4电子束胶定义槽栅图形,槽栅宽度约1.2 µm,而后利 用柠檬酸基溶液(Citric acid/H2O2/H2O)腐蚀形成栅槽。优化的湿 法腐蚀时间为40 s, SEM测试对应的腐蚀深度为38 nm。据此估 计金属栅极到沟道的距离约为12 nm。T型栅的轮廓由PMMA A4/ PMMA-MMA/PMMA A2组成的三层电子束胶直写曝光定义。



 U_{gs} =2.0 V Fig.2 Cross-sectional SEM image of completed 210 nm gate-length T-shaped gate 图2 210 nm栅长T型栅的截面SEM图

其中PMMA A4为底层胶, PMMA MMA为中间层, PMMA A2为顶层胶。栅极肖特基金属为Ti/Pt/Au, 厚度分别为30 nm/20 nm/250 nm。T型栅截面形貌见图2。扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)测试显示栅足和栅帽分别为210 nm和410 nm。最后,为了完成片上器件的直流和射频性能测试,采用平面波导pad引出互连电极,pad金属采用电子束蒸发方式沉积,金属体系为Ti/Au。

3 器件性能

3.1 直流特性

利用Agilent B1500半导体参数分析仪在室温条 件下进行片上器件测试,获得InAlAs/InGaAs异质结 GaAs-mHEMT器件的直流特性。图3给出了室温下 210 nm 栅 长 In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.4}Ga_{0.6}As 异 质 结 GaAsmHEMT单指器件的直流I-U转移特性曲线和跨导特 性曲线,漏端电压偏置固定为1.0 V。从转移特性曲 线可以看出,当栅极电压在-2~-1 V时,漏端电流密 度约为20~25 mA/mm,基本没有变化。器件显示出 不能完全关断特性,这可能是栅极不能完全耗尽栅 极下方沟道中的电子所致。当栅压在-1~0 V时,漏 端电流密度缓慢增加。在栅极电压为0 V时,漏端电 流密度达到46 mA/mm。当栅极电压在0~0.9 V时,漏 端电流密度急剧增加。在栅极电压为0.9 V时,漏端 电流密度增加至159 mA/mm。当栅压大于0.9 V时, 漏端电流密度的增加趋于平缓,基本保持不变。图3 中器件最大沟道电流出现在栅电压为0.95 V时,其值 为160 mA/mm。跨导特性曲线由转移特性曲线经过 一次微分计算获得。栅压在小于0 V时,跨导变化不 明显; 栅压在0~0.5 V时, 跨导急剧增加; 栅压为 0.5 V时,有效跨导达到最大值195 mS/mm;栅压在 0.5~1 V时, 跨导急剧减小。

图 4 给 出 了 210 nm 栅 长 In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.4}Ga_{0.6}As 异质结GaAs-mHEMT单指器件的典型直流*I*-U输出 特性曲线。漏端电压偏置扫描范围从0~2 V,同时栅 极电压从-1 V增加到2 V,步长为0.5 V。图4中直流 *I*-U输出特性曲线与转移特性曲线的变化趋势是相 符的。器件特性表现出一定的翘曲效应(Kink effect), 这可能是由于宽栅槽工艺导致横向腐蚀宽度范围内 的表面态增加所致,以及缺少InP刻蚀截止层的表面 钝化保护作用。

图5给出了利用Agilent B1500半导体参数分析 仪测试的210 nm栅长In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.4}Ga_{0.6}As异质结 GaAs-mHEMT单指器件的栅极漏电特性。源漏电极 同时接地,扫描栅极电压,栅极电压变化范围从 -2.0~2.0 V。从图中可以看出,栅极漏电流非常低, 室温下最大饱和漏电流密度低于1×10⁻⁸ A/µm量级。 低的栅极漏电流有利于降低器件的散粒噪声。

3.2 高频特性

利用Agilent 360 B矢量网络分析仪进行210 nm 栅长、50 µm栅宽InAlAs/InGaAs异质结GaAs-mHEMT 单指器件的片上S参数测试,仪器校准测试范围从



Fig.3 Extrinsic transconductance(g_m) and the drain current(I_{ds}) of the 210 nm gate-length mHEMT as a function of the Gate to Source Voltage(U_{gs}) with U_{ds} =1 V





Fig.4 DC output characteristics of the 210 nm gate-length mHEMT 图4 210 nm栅长mHEMT单指器件的典型直流*I-U*输出特性曲线



Fig.5 Gate leakage current of the 210 nm gate-length mHEMT 图5 210 nm栅长In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.4}Ga_{0.6}As异质结mHEMT单指器件的 栅极漏电特性

0~67 GHz。利用片上Open/Short去嵌技术对测量到的S参数进行pad寄生电容和寄生电感剥离,提取器件频率特性。图6给出了210 nm栅长、50 μ m栅宽 InAlAs/InGaAs异质结沟道GaAs基mHEMT单指器件在最大有效跨导偏置点的频率特性。其中最大有效跨导偏置点:栅极电压0.5 V,漏端电压1.0 V。电流增益截止频率(f_{T})通过电流增益(h_{21})随频率变化的测试数据直接获得。电流增益为0 dB时,测得 f_{T} 为46 GHz。最高振荡频率(f_{max})由图6中功率增益与频率的关系曲线外推得到。按照–20 dB/decade的斜率对其进行外推,功率增益下降为1时,对应于最高振荡频率 f_{max} =115 GHz。

45 MAG/MSG 0 40 h_{21} 35 30 25 gain/dB 20 20 dB/decade 15 10 5 0 -5 0.1 10 100 f/GHz

4 结论

利用电子束光刻技术实现了210 nm栅长、 50 µm栅宽InAlAs/InGaAs异质结GaAs-mHEMT单指 器件,并测试了器件的直流特性和高频特性。最大 Fig.6 Plots of *h*₂₁ and MAG/MSG versus frequency of the 210 nm gate-length mHEMT. The inset shows the enlargement of *f*_{max} position 图6 210 nm栅长、50 μm栅宽mHEMT单指器件在最大有效跨导偏置点的 频率特性

有效输出跨导(g_{m:max})为195 mS/mm,器件最大沟道电流为160 mA/mm,电流增益截至频率(f_T)和最高振荡频率(f_{max})分 别为46 GHz和115 GHz。同时栅极最大饱和漏电流小于1×10⁻⁸ A/μm。器件性能的进一步提高,需要进一步减小栅长, 并增加栅控能力,优化器件制备工艺。

参考文献:

- LI D L,ZENG Y P. Self-consistent analysis of double-δ-doped InAlAs/InGaAs/InP HEMTs[J]. Chinese Physics, 2006,15(11): 2735-2741.
- [2] LI Haiou, HUANG Wei, TANG Chakwah, et al. Fabrication of 160 nm T-gate metamorphic AlInAs/GaInAs HEMTs on GaAs substrates by metal organic chemical vapor deposition[J]. Chinese Physics B, 2011, 20(6):068502.
- [3] CHENG Z Q,CAI Y,LIU J,et al. MMIC LNA based novel composite-channel Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_{0.05}Ga_{0.95}N/GaN HEMTs[J]. Chinese Physics, 2007,16(11):3494-3497.
- [4] DELAGEBEAUDEUF D,LINH N T. Metal-(n) AlGaAs-GaAs two-dimensional electron gas FET[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1982,29(6):955-960.
- [5] DRUMMOND T J,MORKOC H,LEE K,et al. Model for modulation doped field effect transistor[J]. IEEE Electron Device Letters, 1982,3(11):338-341.
- [6] WU Y F,KELLER B P,KELLER S,et al. Short channel AlGaN/GaN MODFET's with 50 GHz f_T and 1.7 W/mm output-power at 10 GHz[J]. IEEE Electron Device Letters, 1997,18(9):438-440.
- [7] TRAVIS J Anderson, ANDREW D Koehler, JORDAN D Greenlee, et al. Substrate-dependent effects on the response of AlGaN/ GaN HEMTs to 2 MeV proton irradiation[J]. IEEE Electron Device Letters, 2014,35(8):826-828.
- [8] XU Jingbo, ZHANG Haiying, WANG Wenxin, et al. 200 nm gate-length GaAs-based MHEMT devices by electron beam lithography[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(22):3585-3589.
- [9] HUANG Jie,LI Ming,TANG ChakWah,et al. g=100 nm T-shaped gate AlGaN/GaN HEMTs on Si substrates with non-planar source/drain regrowth of highly-doped n+-GaN layer by MOCVD[J]. Chinese Physics B, 2014,23(12):128102.
- [10] ZHONG Yinghui,ZHANG Yuming,ZHANG Yimen, et al. 0.15 μm T-gate In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As InP-based HEMT with f_{max} of 390 GHz[J]. Chinese Physics B, 2013,22(12):128503.
- [11] WANG Lidan, DING Peng, SU Yongbo, et al. 100 nm T-gate InAlAs/InGaAs InP-based HEMTs with f₁=249 GHz and f_{max}= 415 GHz[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(3):038501.
- [12] LI Haiou, HUANG Wei, LI Qi, et al. Fabrication of 0.3 μm T-gate metamorphic AlInAs/GaInAs HEMTs on silicon substrates using metal organic chemical vapor deposition[J]. Science CHINA Physics Mechanics & Astronomy, 2012,55(4):644-648.

