

文章编号:1001-9014(2011)03-0255-05

Ka 波段 AlGaIn/GaN HEMT 的研制

王东方^{1,2}, 袁婷婷^{1,2}, 魏珂¹, 刘新宇¹, 刘果果¹

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了提高 AlGaIn/GaN HEMT 的频率, 采用了缩小源漏间距、优化栅结构和外围结构等措施设计了器件结构, 并基于国内的 GaN 外延片和工艺完成了器件制备. 测试表明所研制的 AlGaIn/GaN HEMT 可以满足 Ka 波段应用. 其中 $2 \times 75 \mu\text{m}$ 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 在 30V 漏压下的截止频率为 32GHz, 最大振荡频率为 150GHz; 在 30GHz 连续波测试条件下, 线性增益达到 10.2dB. $6 \times 75 \mu\text{m}$ 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 的截止频率为 32GHz, 最大振荡频率为 92GHz; 在 30GHz 连续波测试条件下, 线性增益达到 8.5dB. 器件的击穿电压在 60V 以上.

关键词: 氮化镓; 高电子迁移率晶体管; Ka 波段; 毫米波

中图分类号: TN325+.3 **文献标识码:** A

Design and implementation of Ka-band AlGaIn/GaN HEMTs

WANG Dong-Fang^{1,2}, YUAN Ting-Ting^{1,2}, WEI Ke¹, LIU Xin-Yu¹, LIU Guo-Guo¹

(1. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve frequency characteristics, AlGaIn/GaN HEMTs were designed by reducing source-drain spacing, optimizing gate-structure and peripheral structure. The devices have been fabricated with domestic GaN epitaxial wafer and process. Measurements indicated that the AlGaIn/GaN HEMTs can operate at Ka-band. At $V_{DS} = 30\text{V}$, the HEMTs with $2 \times 75 \mu\text{m}$ gate-width exhibited a current gain cutoff frequency (f_T) of 32GHz and a maximum frequency of oscillation (f_{max}) of 150GHz; Under CW operating condition at 30GHz, the linear gain reaches 10.2dB. For the HEMTs with $6 \times 75 \mu\text{m}$ gate-width, f_T is 32GHz and f_{max} is 92GHz; Under CW operating condition at 30GHz, the linear gain reaches 8.5dB. The breakdown voltage is over 60V.

Key words: GaN/AlGaIn HEMT; Ka band; millimeter-wave

PACS: 73.40.Kp

引言

AlGaIn/GaN HEMT 具有高击穿电压、高饱和电子漂移速率和高电流密度等优点, 已经成为国内外高频和大功率固态微波功率管的研究热点. 在 4GHz 上 AlGaIn/GaN HEMT 的输出功率密度已经达到 $40\text{W}/\text{mm}^{[1]}$, 单管输出功率在 2GHz 达到 $100\text{W}^{[2]}$. 在高频方面, Ka 波段 (26.5 ~ 40GHz) AlGaIn/GaN HEMT 已经有大量报道, 在 40GHz 上的输出功率密度已经达到了 $10.5\text{W}/\text{mm}^{[3]}$, 单管输出功率达到 $8\text{W}^{[4]}$, 甚至 W 波段 (75 ~ 110GHz) 的 AlGaIn/GaN HEMT 已经出现^[5].

国内 AlGaIn/GaN HEMT 的研究主要还在 C 波

段和 X 波段, 在 8GHz 的输出功率密度达到 $10\text{W}/\text{mm}^{[6]}$. 但目前国内还没有 Ka 波段及更高频率 AlGaIn/GaN HEMT 的报道. 我们基于国内的 GaN 外延片和工艺, 对提高 AlGaIn/GaN HEMT 的频率做了大量研究. 曾经报道了基于蓝宝石衬底 $3.4\text{W}/\text{mm}$ 的 Ku 波段 AlGaIn/GaN HEMT^[7], 以及源漏间距 $2.4 \mu\text{m}$ 的 AlGaIn/GaN HEMT^[8].

本文在此基础上, 通过进一步减小栅长、优化栅结构, 并基于国内 GaN 外延片和工艺研制了 Ka 波段 AlGaIn/GaN HEMT. 其中 $2 \times 75 \mu\text{m}$ 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 在 30V 漏压下的截止频率 (f_T) 为 32GHz, 最大振荡频率 (f_{max}) 为 150GHz; 30GHz 连续波测试条件下, 线性增益达到 10.2dB. 器件的击穿

收稿日期: 2010-03-04, 修回日期: 2011-01-15

Received date: 2010-03-04, revised date: 2011-01-15

基金项目: 自然科学基金“氮化镓基毫米波器件和材料基础与关键问题研究”(60890190)

作者简介: 王东方 (1975-), 男, 山东五莲县人, 博士, 主要研究领域为微波集成电路、声表面波射频识别. E-mail: wdf0155@sina.com.

电压在 60V 以上.

1 器件结构设计

对高频微波功率器件的研制来讲,关键是提高

$$f_{\max} = \frac{f_T}{2[\pi f_T C_{gd}(R_s + R_g + R_{gs} + 2\pi L_S) + G_{ds}(R_s + R_g + R_{gs} + \pi f_T L_S)]^{1/2}}, \quad (1)$$

其中 f_T 主要由跨导、栅长、栅电容决定. 式中的各电参数与器件结构密切相关,因此为了提高频率,需要对器件结构进行优化. 相对于以往 X 波段 AlGaIn/GaN HEMT,本论文对结构的优化主要体现在以下几个方面:

1) 源漏间距缩小到 $2.4\mu\text{m}$. 缩小源漏间距可以减小源电阻 R_s 和漏电阻 R_D ,从而提高器件的 f_T 、 f_{\max} 、增益和效率^[8].

2) 对栅结构作了优化. 为了提高频率并抑制短沟道效应,采用了 $0.25\mu\text{m}$ 的栅长;缩小了栅场板的长度(即栅帽在漏侧的长度)以减小栅漏寄生电容 C_{gd} [10,11];为了减小栅电阻,适当增加了栅帽在源侧的长度以优化 f_{\max} ^[11].

3) 按照相位差不超过 $\pi/16$ 的原则缩小了器件尺寸^[12]. 高频输入信号在栅宽方向以及每个栅指之间会有相位差,这会导致信号的损耗,降低增益,因此应当根据工作频率相应调整器件的尺寸. 按照相位差不超过 $\pi/16$ 的原则缩小了单指栅宽(W_u)和栅栅间距(G_p). 与 $\pi/16$ 相位对应的长度

$$L = \frac{C_0}{32\sqrt{\epsilon}f}, \quad (2)$$

其中 f 为频率, ϵ 为介电常数, C_0 为真空中光速. 因此有

$$W_u < \frac{C_0}{32\sqrt{\epsilon}f}. \quad (3)$$

若栅指数目为 N ,则最外侧的栅与中心点的距离为 $G_p \times (N-1)/2$,因此有 $G_p \times (N-1)/2 < L$,即

$$G_p < \frac{C_0}{16\sqrt{\epsilon}f \cdot (N-1)}. \quad (4)$$

以 Ka 波段最高频率 40GHz、SiC 衬底 GaN 外延片的等效介电常数 7 计算,得 $L = 89\mu\text{m}$. 所以 $W_u < 89\mu\text{m}$,兼顾到频率特性和功率特性两方面,取 $W_u = 75\mu\text{m}$. 若最大栅指数 $N = 10$,则有 $G_p < 20\mu\text{m}$. 为减小器件热阻,取上限 $G_p = 20\mu\text{m}$.

4) 外围布线的拐角采用斜角而不是直角,以减小寄生电感.

器件的 f_T 尤其是 f_{\max} . 根据推算以及经验,要满足 Ka 波段应用, f_{\max} 一般要在 90GHz 以上. AlGaIn/GaN HEMT 的 f_{\max} 满足关系式^[9]

2 器件的制备

GaN 外延片由中科院半导体所提供, $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{AlIn}/\text{GaN}$ 多层结构通过 MOCVD 法生长在 SiC 衬底上,层电阻为 $350\Omega/\square$. 基于中科院微电子所的 2 英寸 GaN 工艺线完成了 AlGaIn/GaN HEMT 的制备. 主要工艺流程是:蒸发 Ti/Al/Ni/Au 并在 870°C 下退火 50 秒形成源漏欧姆接触,测得欧姆接触电阻率为 $8 \times 10^{-6}\Omega \cdot \text{cm}^2$. 用 PECVD 法淀积厚度 120nm 的 SiN 钝化层. 通过电子束直写曝光、栅槽刻蚀、金属蒸发等工艺形成 Ni (35nm)/Au (400nm) T 型栅. 实测栅长为 $0.25\mu\text{m}$,栅帽在漏侧的长度(即栅场板长度)为 $0.2\mu\text{m}$,在源侧的长度为 $0.4\mu\text{m}$. 再经过布线、二次介质、起镀、电镀等工艺完成整个器件的制备. 图 1 是完成后器件的照片, a 为两栅指器件,总栅宽 $2 \times 75\mu\text{m}$,器件面积为 $350\mu\text{m} \times 240\mu\text{m}$, b 为六栅指器件,总栅宽 $6 \times 75\mu\text{m}$,器件面积 $350\mu\text{m} \times 310\mu\text{m}$.

3 直流和小信号特性

图 2 是两栅指 AlGaIn/GaN HEMT 的 $I_{DS} - V_{DS}$ 特性,饱和漏电流为 $1030\text{mA}/\text{mm}$,膝点电压为 2.6V. 图 3 是跨导 (g_m) 和 $I_{DS} - V_g$ 特性,最大跨导为 $352\text{mS}/\text{mm}$,阈电压为 -3.0V. 器件击穿电压超过 60V.

图 4 是在 $V_{ds} = 10\text{V}$ 下测得的栅宽 $2 \times 75\mu\text{m}$ AlGaIn/GaN HEMT 的小信号增益特性(栅压取最佳

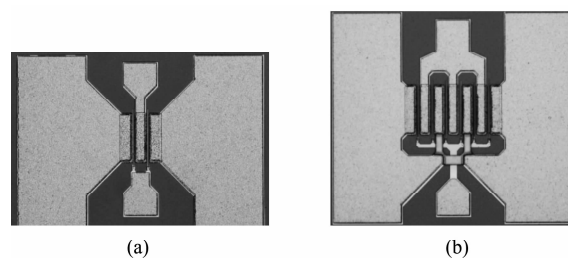


图 1 Ka 波段 AlGaIn/GaN HEMT 照片 (a) 两栅指 (b) 六栅指
Fig. 1 Photos of Ka-band AlGaIn/GaN HEMTs (a) two fingers (b) six fingers

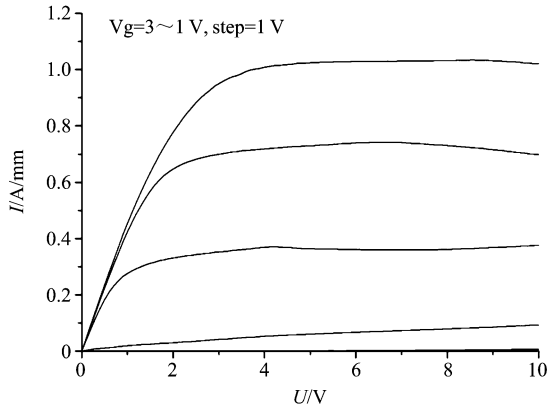


图2 $I_{DS} - V_{DS}$ 特性
Fig.2 Characteristic of $I_{DS} - V_{DS}$

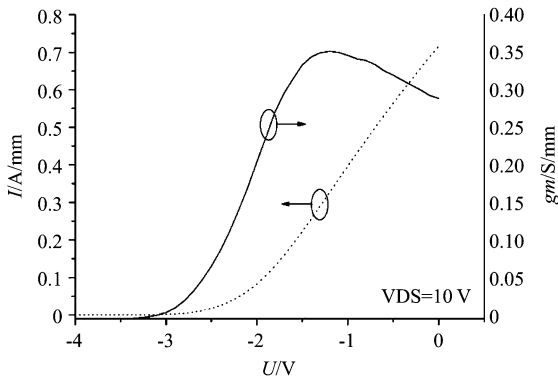


图3 跨导和 $I_{DS} - V_g$
Fig.3 Characteristics of transconductance and $I_{DS} - V_g$

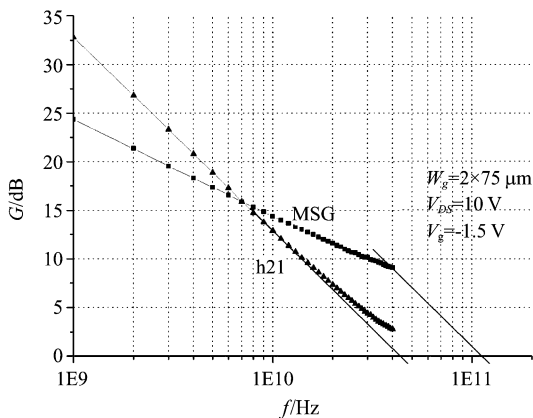


图4 栅宽 $2 \times 75 \mu\text{m}$ AlGaIn/GaN HEMT 在 $V_{DS} = 10\text{V}$ 下的小信号增益
Fig.4 Small signal gains of AlGaIn/GaN HEMTs with gate-width of $2 \times 75 \mu\text{m}$ at $V_{DS} = 10\text{V}$

值), f_T 约 44GHz , f_{max} 在 120GHz 以上. 当 V_{DS} 为 30V 时, f_T 为 32GHz , f_{max} 达到 150GHz , 30GHz 的最大稳定增益 (MSG) 为 12.3dB , 如图 5 所示. 图 6 是

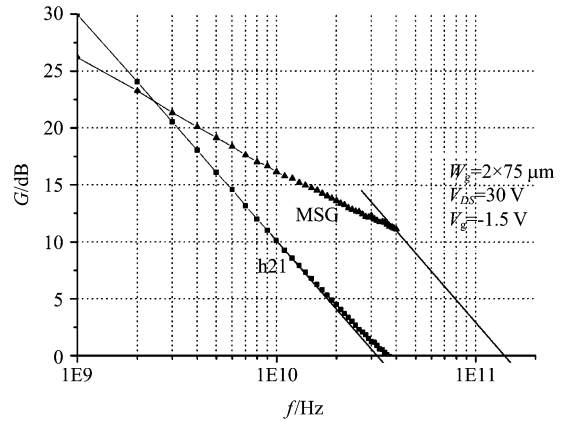


图5 栅宽 $2 \times 75 \mu\text{m}$ AlGaIn/GaN HEMT 在 $V_{DS} = 30\text{V}$ 下的小信号增益
Fig.5 Small signal gains of AlGaIn/GaN HEMTs with gate-width of $2 \times 75 \mu\text{m}$ at $V_{DS} = 30\text{V}$

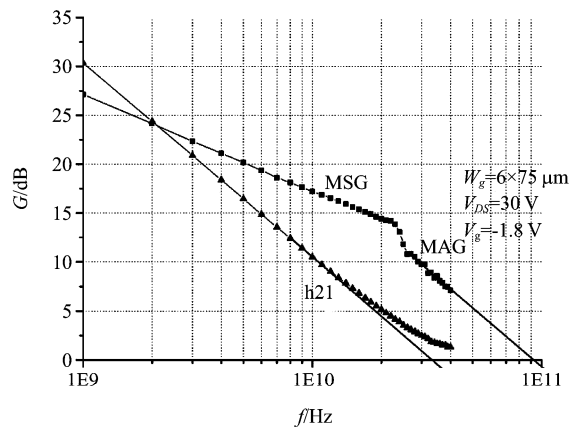


图6 栅宽 $6 \times 75 \mu\text{m}$ AlGaIn/GaN HEMT 在 $V_{DS} = 30\text{V}$ 下的小信号增益
Fig.6 Small signal gains of AlGaIn/GaN HEMTs with gate-width of $6 \times 75 \mu\text{m}$ at $V_{DS} = 30\text{V}$

6 栅指 AlGaIn/GaN HEMT 在 30V 下的小信号增益特性, f_T 约 32GHz , f_{max} 为 92GHz , 30GHz 的最大可用增益 (MAG) 为 9.6dB . 从频率特性看, 这两种 AlGaIn/GaN HEMT 可应用于 Ka 波段.

图 7 是不同栅指数目的 AlGaIn/GaN HEMT 的 f_T 和 f_{max} . 可以看出 6 栅指和 10 栅指 HEMT 的 f_{max} 比单栅指和两栅指的下降很多, 而 f_T 基本相等. 除了栅指数增加导致栅指间的相位差增大外, f_{max} 还受到栅电阻和源电感的影响. 多栅指器件采用了空气桥连接不同的源区, 这增加了源电感; 另外由于栅柄比较细长且金属层薄, 导致栅电阻增加. 这些寄生参数的增大使得多栅指 HEMT 在 20GHz 附近出现 MSG/MAG 的拐点频率, 导致 f_{max} 大大降低. 要解决这一问题, 还需要改进多栅指器件的结构, 例如源区采

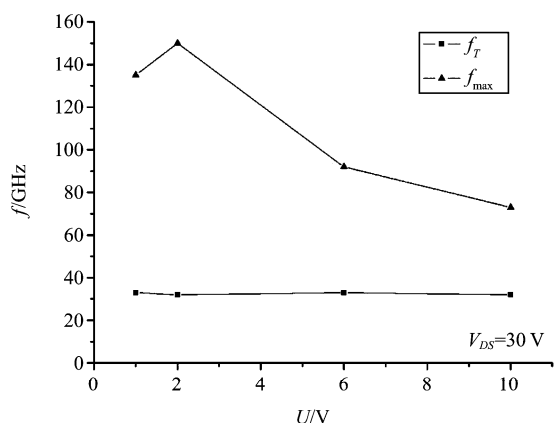
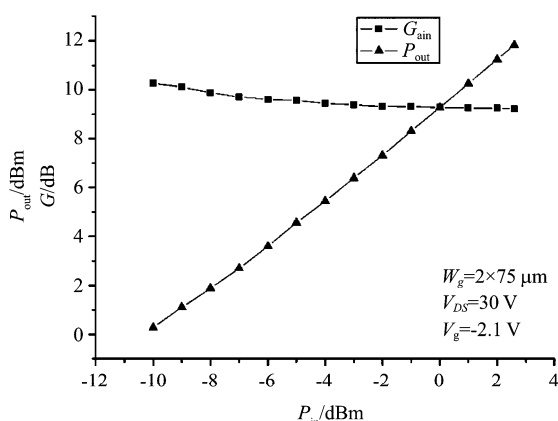
图7 栅指数目与 f_T 和 f_{max} 的关系Fig. 7 Relations between gate-number and f_T , f_{max} 

图8 两栅指 AlGaIn/GaN HEMT 在 30GHz 上的增益

Fig. 8 Gain of AlGaIn/GaN HEMTs with two gate-fingers at 30GHz

用背孔互联,这需要解决工艺实现方面的有关问题.

4 功率测试

用于功率测试的设备是清华大学的 Loadpull 系统 (FOCUS 公司生产),其最大可测功率为 23dBm,通过该系统测得线性增益是可行的,但对于 AlGaIn/GaN HEMT 最大输出功率测试是远不够的,不过这是我们所知的国内唯一可以在 Ka 波段测试的 Loadpull 系统. 图 8 和图 9 是两栅指 AlGaIn/GaN HEMT 在 30GHz 上的增益和输出功率.

图 8 是按照最大功率增益匹配得到的测试结果,此情况下信号源提供的最大输入功率只能达到 2.6dBm. 当输入信号为 -10dBm 时,增益为 10.27dB,输入功率为 -5dBm 时增益为 9.57dB,减小 0.7dB. 随着功率继续增加,增益减小不明显.

为了进一步提高输入功率以观察器件的输出功

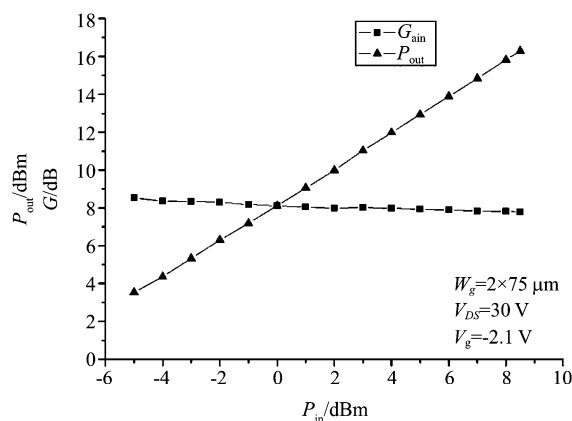


图9 两栅指 HEMT 在 30GHz 上的输出功率 (调整输入匹配以获得更大输入功率)

Fig. 9 Output power of AlGaIn/GaN HEMTs with two gate-fingers at 30GHz (the input math was adjusted for higher input power)

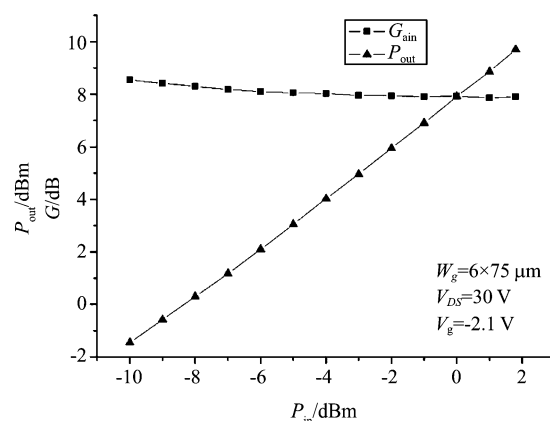


图10 六栅指 AlGaIn/GaN HEMT 在 30GHz 上的增益

Fig. 10 Gain of AlGaIn/GaN HEMTs with six gate-fingers at 30GHz

率能力,调整了输入匹配点. 此时由于 HEMT 输入端失配,线性增益下降为 8.6dB,但信号源可提供的最大输入功率增加到 8.5dBm. 测试结果如图 9 所示,当输出功率达到 16.4dBm 时,增益仅降低 0.7dB,说明器件仍远未达到饱和输出.

图 10 是 6 栅指器件的测试结果,测得其在 30GHz 的线性增益为 8.5dB. 同样,受测试条件限制而没有得到最大输出功率.

5 结论

本文采用缩小源漏间距、优化栅结构和外围结构等措施设计了 AlGaIn/GaN HEMT,并基于国内的 GaN 外延片和工艺完成了器件制备. 测试表明,所研制栅长 0.25 μm 的 AlGaIn/GaN HEMT 表现出良好的频率特性. 其中,2 \times 75 μm 栅宽 AlGaIn/GaN

HEMT 在 10V 漏压下的 f_T 达到 44GHz, f_{max} 达到 120GHz; 当漏压为 30V 时, f_T 为 32GHz, f_{max} 为 150GHz; 30GHz 连续波测试条件下, 线性增益达到 10.2dB. $6 \times 75 \mu\text{m}$ 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 在漏压 30V 下 f_T 为 32GHz, f_{max} 为 92GHz; 30GHz 连续波测试条件下, 线性增益 8.5dB. 受测试条件的限制, 没有得到这两种器件在 Ka 波段的最大输出功率. 但已有的测试数据表明, 所研制的 AlGaIn/GaN HEMT 是可以应用于 Ka 波段的. 这也说明所采用的提高 AlGaIn/GaN HEMT 频率的设计措施是有效的, 用国内的 GaN 外延片和工艺实现 Ka 波段甚至更高频率 AlGaIn/GaN HEMT 是可行的.

REFERENCES

- [1] WU Y F, MOORE M, SAXLER A, *et al.* 40-W/mm double field-plated GaN HEMTs. IEEE 64th Device Research Conference, 2006[C]. Goleta; Cree Inc., 2006:151 - 152.
- [2] VETURY R, WEI Y, GREEN D S, *et al.* High power, high Efficiency, AlGaIn/GaN HEMT technology for wireless base station applications. IEEE MTT-S International Microwave Symposium digest, 2005 [C]. Charlotte; [s. n.], 2005: 487—490.
- [3] PALACIOS T, CHAKRABORTY A, RAJAN S, *et al.* High-power AlGaIn/GaN HEMTs for Ka-band applications [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2005, **26**(11):781—783.
- [4] WU Y F, MOORE M, SAXLER A, *et al.* 8-watt GaN HEMTs at millimeter-wave frequencies. IEEE International Electron Devices Meeting, 2005 [C]. [s. l.]: [s. n.], 2005:583—585.
- [5] MICOVIC M, KURDOGHLIAN A, HASHIMOTO P, *et al.* GaN HFET for W-band power applications. IEEE International Electron Devices Meeting, 2006 [C]. Malibu; [s. n.], 2006:1—3.
- [6] JIMENEZ J L, CHOWDHURY U. X-band GaN FET reliability. IEEE 46th International Reliability Physics Symposium, 2008 [C]. Richardson; [s. n.], 2008:429—435.
- [7] WANG Dongfang, CHEN Xiaojuan, LIU Xinyu. A Ku-band 3.4W/mm power AlGaIn/GaN HEMT on a sapphire substrate[J]. *Journal of Semiconductors* (王东方, 陈晓娟, 刘新宇. 基于蓝宝石衬底的 Ku 波段 3.4W/mm AlGaIn/GaN HEMT. *半导体学报*), 2010, **31**(2):024001-1 ~ 024001-2.
- [8] WANG Dongfang, WEI Ke, YUAN Tingting, *et al.* High performance AlGaIn/GaN HEMTs with 2.4 μm source-drain spacing[J]. *Journal of Semiconductors* (王东方, 魏珂, 袁婷婷, 等. 源漏间距 2.4 μm 的高性能 AlGaIn/GaN HEMT. *半导体学报*), 2010, **31**(3):034001-1 ~ 034001-3.
- [9] SUN Y, EASTMAN L F. Trade-offs and challenges of short channel design on millimetre-wave power performance of GaN HFETs[J]. *Electronics Letters*. 2005, **41**(15).
- [10] WANG Dongfang, LIU Xinyu. Simulation on Gate Structure of Ka Band AlGaIn/GaN HEMT[J]. *Chinese Journal of Electron Devices* (王东方, 刘新宇. Ka 波段 AlGaIn/GaN HEMT 栅结构仿真. *电子器件*), 2009, **32**(5):859—863.
- [11] WANG Dongfang, YUAN Tingting, WEI Ke, *et al.* Gate-structure optimization for high frequency power AlGaIn/GaN HEMTs[J]. *Journal of Semiconductors* (王东方, 袁婷婷, 魏珂, 等. 高频功率 AlGaIn/GaN HEMT 的栅结构优化. *半导体学报*), 2010, **31**(5):054003-1—054003-4.
- [12] INOUE Takashi, ANDO Yuji, MIYAMOTO Hironobu, *et al.* 30-GHz-band over 5-W power performance of short-channel AlGaIn/GaN heterojunction FETs [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 2005, **53**(1):74—80.
- [1] HOU Biao, ZHAI Yan-Xia, JIAO Li-Cheng. Second Generation Bandelet-Domain Hidden Markov Tree-3S Model For SAR Image Segmentation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (侯彪, 翟艳霞, 焦李成. 用于 SAR 图像分割的第二代 Bandelet 域 HMT-3S 模型, *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(2):145—149.
- [2] Zhu X J. *Semi-supervised learning literature survey* [M]. Computer Sciences Technical Report 1530, University of Wisconsin-madison, July, 2008.
- [3] Xu J Z, Chen X M, Huang X J. Interactive Image Segmentation by Semi-supervised Learning Ensemble [C]. *Proceedings of the 2008 International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling*. IEEE Computer Society, 2008, 645—648.
- [4] Belkin M, Niyogi P, Sindhvani V. Manifold Regularization: a Geometric Framework for Learning from Labeled and Unlabeled Examples [J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2006, **7**:2399—2434.
- [5] Vincent L, Solille P. Watershed in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based Immersion Simulations [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 1991, **13**(6):38—598.
- [6] Haris K. Hybrid Image Segmentation Using Watersheds and Fast Region Merging [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, **7**(12):1684—1699.
- [7] Zelnik M L, Perona P. Self-Tuning Spectral Clustering [C]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, MIT Press, 2004, **17**:1601—1608.
- [8] Hu Z L, Guo D Z, Sheng Y H. Extracting textural information of satellite SAR image based on wavelet decomposition [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, **5**:423—427.
- [9] Wu K P, Wang S D. Choosing the Kernel parameters of Support Vector Machines According to the Inter-cluster Distance [J]. *Pattern Recognition*, 2009, **42**(5):710—717.

(上接 254 页)