

增强型 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管高温退火研究*

王 冲[†] 全 思 马晓华 郝 跃 张进城 毛 维

(宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

(2010 年 1 月 18 日收到; 2010 年 2 月 4 日收到修改稿)

深入研究了两种增强型 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 高温退火前后的直流特性变化. 槽栅增强型 AlGaIn/GaN HEMT 在 500 °C N₂ 中退火 5 min 后, 阈值电压由 0.12 V 正向移动到 0.57 V, 器件 Schottky 反向栅漏电流减小一个数量级. F 注入增强型 AlGaIn/GaN HEMT 在 400 °C N₂ 中退火 2 min 后, 器件阈值电压由 0.23 V 负向移动到 -0.69 V, 栅泄漏电流明显增大. 槽栅增强型器件退火过程中 Schottky 有效势垒提高, 增强了栅对沟道载流子的耗尽能力, 使器件阈值电压正方向移动, 同时降低了栅反向漏电流, 而且使得栅能工作在更高能的正向栅压下. F 注入增强型器件在退火后由于 F 离子对二维电子气的耗尽作用在退火后减弱, 造成阈值电压负方向移动; F 注入对势垒的提高作用在退火后有所减弱, 引起了 Schottky 泄漏电流明显增大. 退火后 F 注入增强型器件的沟道电子迁移率得到明显恢复.

关键词: 高电子迁移率晶体管, AlGaIn/GaN, 增强型器件

PACC: 7320D, 7360L

1. 引 言

基于 AlGaIn/GaN 异质结的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 在高温器件及大功率微波器件方面已显示出了优势^[1,2], 为了更进一步满足 AlGaIn/GaN HEMT 在开关、数字电路等领域的应用, 增强型 AlGaIn/GaN HEMT 逐渐成为研究的热点. Lanford 等^[3] 采用槽栅结构来实现增强型器件, 但 Schottky 栅制作在被刻蚀的 AlGaIn 层上, 刻蚀损伤会引起栅泄漏电流的增大及界面态的产生^[4]. Cai 等^[5,6] 采用 F 注入的方法研制出了非槽栅的增强型 AlGaIn/GaN HEMT, 并研究了器件退火后阈值电压、跨导等特性参数的变化情况. 国内近些年也有增强型 AlGaIn/GaN HEMT 研究的报道^[7]. 对 AlGaIn/GaN HEMT 进行高温退火能提高栅 Schottky 接触特性, 消除工艺中引入的等离子体损伤, 而且对器件阈值电压有明显影响^[8]. 本文对自行研制出的槽栅增强型 AlGaIn/GaN HEMT 和 F 注入增强型 AlGaIn/GaN HEMT 进行了高温退火实验, 研究了器件饱和电流、最大跨导、阈值电压和栅泄漏电流等参数在退火后

的变化, 并分析了器件参数变化的机理.

2. 实 验

采用 MOCVD 方法在蓝宝石衬底基片 (0001) 面上外延生长了 AlGaIn/GaN 异质结. 蓝宝石衬底厚度为 330 μm, 材料层结构由下而上依次为: 3 μm 未掺杂 GaN 外延层, 5 nm 未掺杂 AlGaIn 隔离层, 12 nm Si 掺杂 AlGaIn 层 (Si 掺杂浓度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 5 nm 未掺杂 AlGaIn 帽层. 光致发光 (PL) 谱测量后计算得到的 AlGaIn 层 Al 组分为 27% ($\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{N}$). Hall 效应测量显示, 室温下蓝宝石衬底上生长的材料的二维电子气 (2DEG) 迁移率 μ 和面密度 N_s 分别为 $1267 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 和 $1.12 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. 槽栅增强型 HEMT 器件结构如图 1 所示, F 注入增强型 HEMT 采用相同的材料结构.

两种增强型器件, 除了在栅工艺步骤有所不同外, 其他工艺均相同. 器件台面隔离均采用感应耦合等离子体 (ICP) 干法刻蚀, 刻蚀深度为 150 nm, 刻蚀速率为 100 nm/min; 源漏 Ohm 接触均采用 Ti/Al/Ni/Au (30 nm/180 nm/40 nm/60 nm) 870 °C N₂ 中

* 国家科技重大专项 (批准号: 2008ZX01002-002)、国家自然科学基金重大项目 (批准号: 60890191)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60736033)、中国国防科技预研基金 (批准号: 51308030102) 和西安电子科技大学回国人员创新基金资助的课题.

[†] E-mail: wangchong197810@hotmail.com

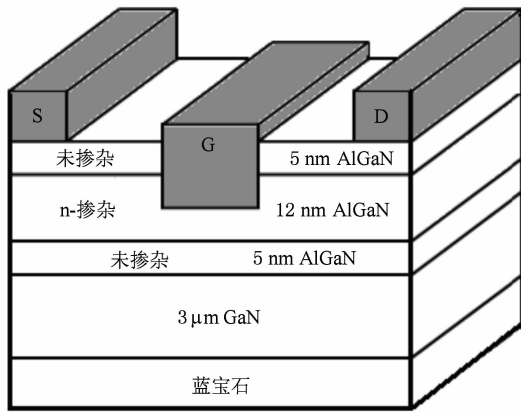


图1 槽栅增强型 AlGaIn/GaN HEMT 结构图

退火. 对槽栅增强型 HEMT, 在做好栅掩模后采用 ICP 干法刻蚀 10 nm 栅槽, 刻蚀速率为 0.1 nm/s, 刻蚀偏压为 50 V. 对 F 注入增强型 HEMT, 在做好栅掩模后对栅区域采用反应离子刻蚀 (RIE) 进行 CF_4 等离子体处理, 功率 150 W, 时间 150 s. 栅金属蒸发均采用电子束蒸发的方法进行, 而后剥离形成栅电极, 栅金属采用 Ni/Au (30 nm/200 nm). 两种增强型 AlGaIn/GaN HEMT 结构均为: 栅长为 1 μm , 栅宽为 100 μm , 源漏间距为 4 μm . 对制作好的两种增强型器件都采用 AW410 退火炉进行 N_2 气氛的高温热退火. 器件参数测量采用 Agilent B1500A 半导体参数分析仪进行.

3. 结果和讨论

AlGaIn/GaN HEMT 源漏之间的主要电导由 2DEG 导电沟道提供, 由 AlGaIn 势垒层上的 Schottky 栅施加偏压来控制沟道 2DEG 的浓度以及器件的工作状态. 当对器件进行槽栅刻蚀后, 即减小 Schottky 栅到沟道的距离能提高栅控能力^[9], 同时增强 Schottky 栅对沟道 2DEG 的耗尽作用, 器件阈值电压也发生变化. 阈值电压 V_T 可表示为^[10]:

$$V_T = \Phi_B - \frac{\Delta E_C}{e} - \frac{eN_{\text{Si}}(d - d_i)^2}{\epsilon} - \frac{\sigma_{\text{pol}}}{\epsilon}d, \quad (1)$$

其中 σ_{pol} 为极化电荷, e 为电子电量, Φ_B 为 Schottky 势垒高度, ΔE_C 为导带不连续性, N_{Si} 为 AlGaIn 中 Si 掺杂浓度, ϵ 为 AlGaIn 介电常数. 从 (1) 式中的可以看出, 当刻蚀形成槽栅后 d 减小, 栅对沟道 2DEG 的耗尽作用增强使得阈值电压向正方向移动. 对于槽栅增强型 HEMT, 当栅槽深度增大到一定程度后等离子体更容易对沟道产生刻蚀损伤, 所以依靠增加槽

栅深度继续提高正向阈值电压难度较大. 对器件进行一定优化条件下的高温退火能有效提高栅 Schottky 特性, 增大 Schottky 势垒高度 Φ_B , 同样能使得器件阈值电压向正方向移动.

采用 F 注入的方法, 可以在栅下方的 AlGaIn 层中产生负电荷, 这些不可动的负电荷对 2DEG 产生耗尽作用, 使得阈值电压向正方向移动. 考虑了 F 注入负电荷影响的阈值电压表达式修正为^[6]:

$$V_T = \Phi_B - \frac{\Delta E_C}{e} - \frac{\sigma_{\text{pol}}}{\epsilon}d - \frac{e}{\epsilon} \int_0^d dx \int_0^x (N_{\text{Si}}(x) - N_F) dx - edN_{\text{si}}/\epsilon - eN_b/C_b, \quad (2)$$

其中 N_F 为注入的负电荷, N_{si} 为表面陷阱负电荷, N_b 为有效缓冲层负电荷, C_b 为单位面积缓冲层到沟道的电容. 通过控制不同功率和时间的 CF_4 等离子体处理, 可以控制负电荷的数量, 从而达到对阈值电压的正方向移动的控制.

槽栅增强型 HEMT 和 F 注入增强型 HEMT 的导带结构如图 2 所示.

通过高温退火提高 AlGaIn/GaN HEMT 栅 Schottky 接触特性已有较多研究^[8,11], 本实验对槽栅增强型 AlGaIn/GaN HEMT 选用经过优化的退火条件 500 $^\circ\text{C}$ 5 min N_2 气氛中退火^[11], 退火前后器件转移特性的对比如图 3 和图 4 所示.

槽栅增强型 AlGaIn/GaN HEMT 经过 500 $^\circ\text{C}$ 5 min N_2 气氛中退火后, 器件阈值电压由 0.12 V 正向移动到 0.57 V, 器件最大跨导略有下降. 器件退火后栅泄漏电流的变化如图 5 所示. 器件栅 Schottky 泄漏电流在反偏 20 V 由 526 $\mu\text{m}/\text{mm}$ 减小到 47 $\mu\text{m}/\text{mm}$. Lanford 等对所制作的槽栅增强型 HEMT 进行 500 $^\circ\text{C}$ 5 min N_2 气氛退火后, 阈值电压从 0.35 V 提高到 0.47 V, 而跨导和相同栅压下饱和电流均有所下降, 由于该器件在槽栅刻蚀工艺完成尚未做栅时即进行了一次高温退火处理, 所以栅高温退火后阈值电压正向移动较小^[3]. AlGaIn/GaN 异质结材料存在表面陷阱, 退火过程中 Ni 向 AlGaIn 层逐渐扩散能够填充 AlGaIn 表面的陷阱^[11], 使金属-半导体接触性能改善, 从而提高 Schottky 势垒. Schottky 势垒高度提高能增加对沟道的耗尽作用从而使阈值电压向正方向移动, 同时材料缺陷辅助隧穿泄漏电流在退火后得到一定程度抑制^[12]. 器件退火后 Schottky 正向开启电压明显增大, 这使得器件最大正向工作栅压从 1.5 V 提高到 2.5 V, 从而提高了最

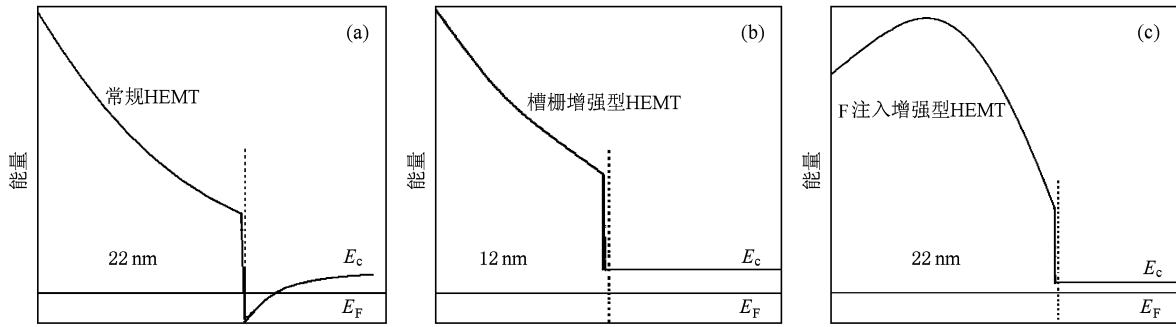


图 2 槽栅增强型 HEMT 和 F 注入增强型 HEMT 异质结能带示意图 (a)常规 HEMT,(b)槽栅增强型 HEMT,(c)F 注入增强型 HEMT

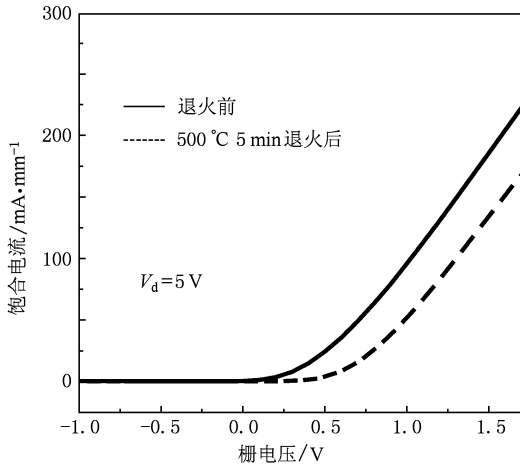


图 3 槽栅增强型 HEMT 退火前后转移特性

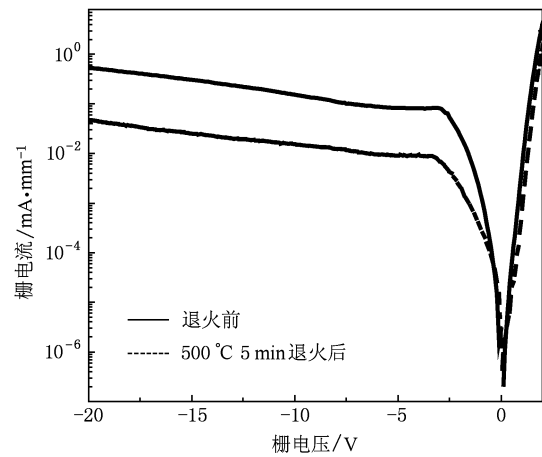


图 5 槽栅增强型 HEMT 退火前后栅反向泄漏电流

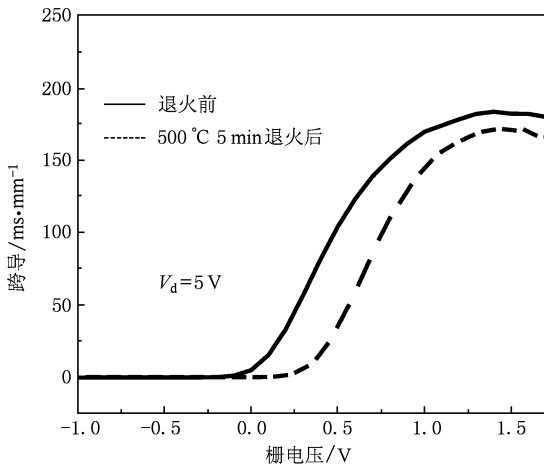


图 4 槽栅增强型 HEMT 退火前后跨导

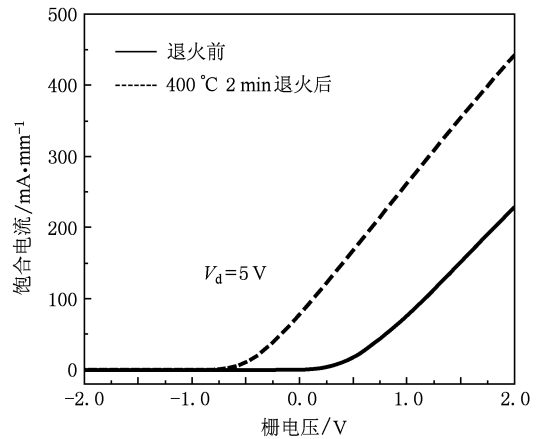


图 6 F 注入增强型 HEMT 退火前后转移特性

大饱和电流.

F 注入增强型 AlGa_N/Ga_N HEMT 经过 400 °C 2 min N₂ 气氛中退火后,器件阈值电压由 0.23 V 负方向移动到 -0.69 V,器件最大跨导从 155 ms/mm 提高到 181 ms/mm,如图 6 和图 7 所示.器件在退火中

恢复了等离子体处理引入的损伤,提高了沟道迁移率,器件最大跨导明显提高.器件退火后栅泄漏电流的变化如图 8 所示,器件栅 Schottky 泄漏电流在反偏 20 V 由 12 μm/mm 增加到 245 μm/mm. Cai 等^[5]对采用 F 注入增强型 AlGa_N/Ga_N HEMT 进行 400 °C 10 min 退火后,器件阈值电压仅有微小负向

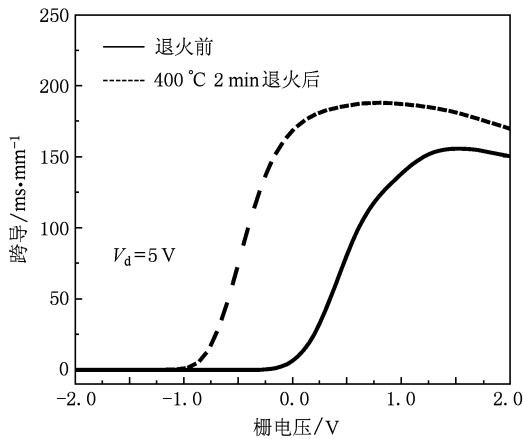


图 7 F 注入增强型 HEMT 退火前后跨导

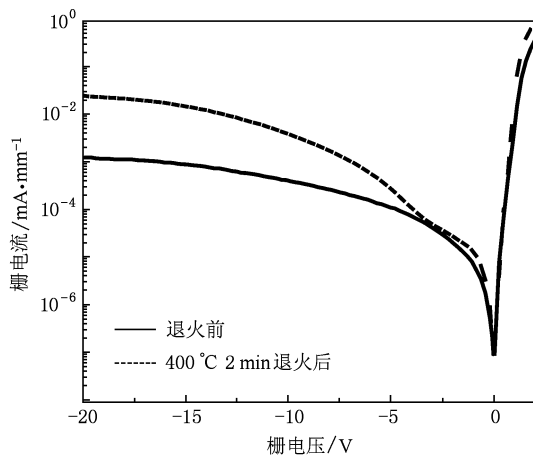


图 8 F 注入增强型 HEMT 退火前后栅反向泄漏电流

移动,而栅泄漏电流略有减小,这与本实验的研究结果有明显差异. Cai 等^[5]对退火前后的 AlGaIn 中注入的 F 离子进行了二次离子质谱(SIMS)分析,认为退火后 F 离子总量和峰值浓度未发生变化,这支持了其阈值电压和泄漏电流退火后基本不变的研究结论. F 注入引入的负离子对沟道 2DEG 产生耗尽作用,使得阈值电压正向移动;同时注入的负离

子提高了 AlGaIn 中的导带,对 Schottky 反向泄漏电流产生了抑制作用. 器件采用的材料和 F 注入的工艺有较大差异,这些原因都可能造成退火后器件参数变化的差异. F 离子在 AlGaIn 中的分布和其温度稳定性难以有定量的测量, F 离子在 AlGaIn 中的存在机理还需要进一步研究.

表 1 对两种增强型 HEMT 的退火前后直流参数的变化进行了总结.

表 1 槽栅增强型 HEMT 和 F 注入增强型 HEMT 直流参数退火前后对比

	阈值电 压/V	最大饱和 电流/ mA/mm	最大跨 导/ mS/mm	反向栅泄 漏电流/ 20 V	
槽栅增强 型 HEMT	退火前	0.12	192@1.5 V 栅压	188	526
	退火后	0.57	336@2.5 V 栅压	172	47
F 注入增强 型 HEMT	退火前	0.23	232@2 V 栅压	155	12
	退火后	-0.69	448@2 V 栅压	181	245

4. 结 论

从理论上分析了槽栅增强型 AlGaIn/GaN HEMT 和 F 注入增强型 AlGaIn/GaN HEMT 的形成机理,并对高温退火前后的器件直流参数变化规律进行了研究. 研究显示:槽栅增强型 HEMT 退火后阈值电压明显正向移动, Schottky 特性改善,退火过程中 Schottky 势垒高度提高对沟道 2DEG 的耗尽作用增强使得阈值电压正向移动,同时减小了栅泄漏电流. F 注入增强型 HEMT 退火后等离子体损伤得到恢复,跨导和饱和电流明显增大,而由于注入的 F 离子的稳定性问题,阈值电压负向移动,栅泄漏电流增大. 对于槽栅增强型 HEMT,高温退火有利于特性的改善;而对于 F 注入增强型 HEMT,还需要进一步提高 F 注入离子的温度稳定性,使器件高温退火能提高电流和跨导的同时保持阈值电压和泄漏电流不恶化.

[1] Masataka H, Toshiaki M, Takashi M 2006 *IEEE Electron. Device. Lett.* **27** 16
 [2] Nakayama T, Ando Y, Okamoto Y, Inoue T, Miyamoto H 2006 *Electron. Lett.* **42** 489
 [3] Lanford W B, Tanaka T, Otoki Y, Adesida I 2005 *Electron. Lett.* **41** 449
 [4] Zhang H, Miller E J, Yu E T 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 023703

[5] Cai Y, Zhou Y G, Chen K J, Lau K M 2005 *IEEE Electron. Device. Lett.* **26** 435
 [6] Cai Y, Zhou Y G, Lau K M, Chen K J 2006 *IEEE Trans. Electron. Device.* **53** 2207
 [7] Wang C, Zhang J F, Quan S, Hao Y, Zhang J C, Ma X H, 2008 *Chin. J. Semiconduct.* **29** 1682
 [8] Lin R B, Wang X J, Feng Q, Wang C, Zhang J C, Hao Y 2008

- Acta Phys. Sin.* **55** 4487 (in Chinese) [林若兵、王欣娟、冯倩、王 冲、张进城、郝 跃 2008 物理学报 **57** 4487]
- [9] Wang C, Quan S, Zhang J F, Hao Y, Feng Q, Chen J F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1966 (in Chinese) [王 冲、全 思、张金凤、郝 跃、冯 倩、陈军峰 2009 物理学报 **58** 1966]
- [10] Drozdovski N V, Caverly R H 2002 *Trans. Microwave Theory Tech.* **50** 4
- [11] Wang C, Feng Q, Hao Y, Wan H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6085 (in Chinese) [王 冲、冯 倩、郝 跃、万 辉 2006 物理学报 **55** 6085]
- [12] Jeon C M, Jang H W, Lee J L 2002 *Appl. Phys. Lett.* **82** 391

High temperature annealing of enhancement-mode AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors *

Wang Chong[†] Quan Si Ma Xiao-Hua Hao Yue Zhang Jin-Cheng Mao Wei

(Key Laboratory of Wide Band Gap Semiconductor Materials and Devices, The School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 18 January 2010; revised manuscript received 4 February 2010)

Abstract

The high temperature annealing effect of DC characteristics of the different enhancement-mode AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors (HEMTs) were investigated. The threshold voltage shifted from 0.12 V to 0.57 V and the gate leakage current was reduced one order after the recessed-gate enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMTs were annealed at 500 °C for 5 min in N₂ atmosphere. The threshold voltage shifted from 0.23 V to -0.69 V and the gate leakage current increased after the F-implantation enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMTs were annealed at 400 °C for 2 min in N₂ atmosphere. The height of Schottky barrier increased in annealing process that enhanced the depletion of gate to channel electrons, so that the threshold voltage shifted in the positive direction of x axis, the gate leakage current was reduced and the device can work at higher gate voltage. The depletion of F ions and the increased barrier height of F ions were weakened after annealing, so that the threshold voltage shifted in negative direction of x axis and the gate leakage current increased. The channel electron mobility of F-implantation enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMTs increased obviously after annealing process.

Keywords: high electron mobility transistor, AlGaIn/GaN, enhancement-mode device

PACC: 7320D, 7360L

* Project supported by the National Key Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2008ZX01002-002), the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60890191), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60736033), the Chinese Defence Advance Research Program of Science and Technology (Grant No. 51308030102) and the Innovation Fund for Returned Staff of Xidian University.

[†] E-mail: wangchong197810@hotmail.com