

一种平面型 GaAs 场效应晶体管*

邓 先 灼
(河北半导体研究所)

提 要

本文提出了一种新的平面型砷化镓肖特基势垒场效应晶体管 (GaAs MESFET) 结构, 阐述了用氧离子注入制作此种平面型器件的计算和实验结果。将制得的平面器件与通常的台式器件作了比较。看出平面型器件在微波特性和制作工艺上具有明显优点。

一、引 言

通常国内外 GaAs 肖特基势垒场效应器件 (GaAs MESFET) 均采用台式结构, 它在工艺上具有较大的局限性, 例如: 为了提高器件的电特性, 栅长越做越小, 目前许多器件已进入亚微米量级, 这样细的栅金属条跨过台面边缘的台阶时, 很容易断条。为了避免此现象, 就需加宽栅颈, 这使栅电容增大, 对微波特性是不利的。Fukuta 等人^[1]引入了双台面结构, 可以使栅颈跨过两个较矮的台阶与栅柄相连 (如图 1)。但此法只能治标不能治本, 当外延层加厚, 栅长进一步缩短至 $0.2-0.5\mu$ 时, 双台面结构仍将出现与单台面结构同样的困难。

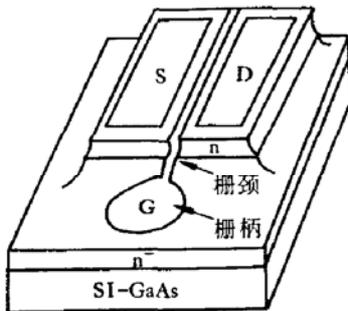


图 1 台面型 GaAs MESFET

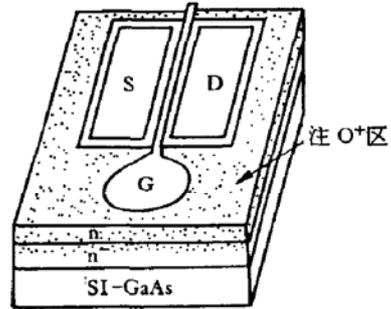


图 2 平面型 GaAs MESFET

本文提出一个根本克服此困难的方法, 即用离子注入法制作平面型器件, PL-GaAs MESFET 的栅条不需要跨过台阶 (如图 2), 再细的亚微米栅条也不会断条。而且, 在平面上制作亚微米栅结构比在高低不平的台面上制作工艺的难度要小得多。更重要的是平面器件具有更为优良的微波特性。

早先人们曾将质子注入 GaAs 获得过半绝缘层, 但是热稳定性很差, 400°C 就开始逐渐失去绝缘性能。Favennec^[2,3] 等人将 $300\text{keV}-1.3\text{MeV}$ 的高能 O^+ 离子注入 N-GaAs, 获得了埋入或不埋入 GaAs 的半绝缘层。本文作者等人在低能氧注入 GaAs 的研究中^[4],

* 1979年10月19日

观察到 O^+ 注入 GaAs 形成的半绝缘层, 其热稳定的温度可以随注入剂量的加大而提高 (可达 800°C 以上), O^+ 注入 N 型或 P 型 GaAs 均能形成良好的半绝缘层, 提出 O^+ 注入 GaAs 中引入了双深能级补偿载流子的机构, 解释了上述实验现象. 本文将进一步叙述应用 O^+ 离子注入制成平面型亚微米 PL-GaAs MESFET 的理论计算和实验结果.

二、理论计算

根据 LSS 理论^[5], 可以计算物质中入射离子的射程和标准偏差, 从而可以知道注入离子在物质中的分布. 离子注入化合物半导体中的分布形式较为复杂, 对于本工作的目的, 我们假设氧离子注入 GaAs 中服从高斯分布 (如图 3):

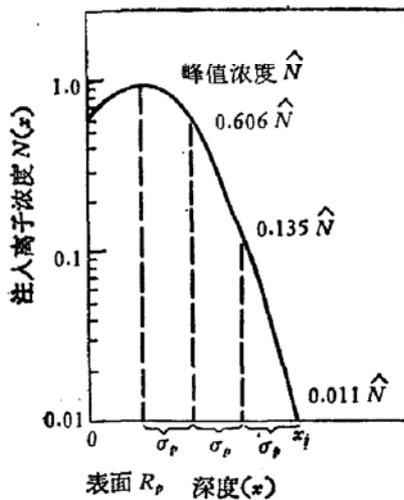


图 3 注入离子浓度分布

$$N(x) = \frac{\phi}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\sigma_p^2}\right], \quad (1)$$

式中 x ——沿离子束入射方向离物质表面的距离,
 ϕ ——注入离子的剂量,
 R_p ——在 x 方向的投影射程,
 σ_p ——投影射程的标准偏差.

位置 R_p 处对应的离子浓度为峰值浓度

$$\hat{N} = \frac{\phi}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} = \frac{0.399\phi}{\sigma_p}. \quad (2)$$

不难证明: $x = R_p + \sigma_p$ 处, 注入离子浓度 $N_{R_p + \sigma_p}$ 下降至峰值浓度的 0.606 倍, $x = R_p + 2\sigma_p$ 处, $N_{R_p + 2\sigma_p} = 0.135\hat{N}$, 已下降一个数量级, $x = R_p + 3\sigma_p$ 处, $N_{R_p + 3\sigma_p} = 0.011\hat{N}$, 下降了两个数量级. 为了计算 O^+ 注入 GaAs 的补偿作用, 我们定义 $x = R_p + 3\sigma_p$ 处为 O^+ 离子注入的“结深” X_j .

不同注入能量 E_0 下, 氧在 GaAs 中的 R_p 和 σ_p 已由 Gibbons J. F.^[6] 进行了数字计算, 连同我们计算的“结深”数据列于表 1.

1. 制备 PL-GaAs MESFET 注 O^+ 能量和剂量的计算

通常制备 GaAs MESFET 采用在半绝缘 GaAs 衬底上生长的带缓冲层的双层外延片, 即 N-N-SIGaAs 结构 (如图 4). 在电阻率 $\rho \geq 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 的半绝缘衬底片 SIGaAs 上, 先外延一层 N 高纯缓冲层, 载流子浓度 $\leq 10^{13} \text{cm}^{-3}$, 厚度为 $3-5 \mu$. 在缓冲层上再生长一层极薄的 N 型外延层, 厚度 $a = 0.2 - 0.4 \mu$, 载流子浓度为 $1-2 \times 10^{17} / \text{cm}^3$.

器件制造要求将源-漏周围的 N 型层变为半绝缘层, 以替代台面起隔离源和漏, 并隔离同

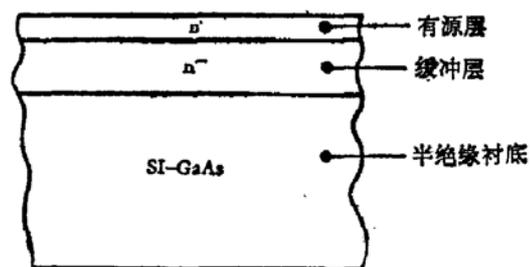


图 4 MESFET 用 GaAs 双层外延材料

表 1 O^+ 注入 GaAs 中的 R_p 、 σ_p 和 X_j

$E_0(\text{keV})$	$R_p(\mu)$	$\sigma_p(\mu)$	$X_j(\mu)$	$E_0(\text{keV})$	$R_p(\mu)$	$\sigma_p(\mu)$	$X_j(\mu)$
10	0.0156	0.0128	0.0540	220	0.3422	0.1277	0.7253
20	0.0297	0.0219	0.0954	240	0.3726	0.1344	0.7758
30	0.0443	0.0302	0.1349	260	0.4026	0.1407	0.8247
40	0.0593	0.0397	0.1784	280	0.4323	0.1466	0.8721
50	0.0747	0.0451	0.2100	300	0.4616	0.1522	0.9182
60	0.0903	0.0519	0.2460	320	0.4907	0.1575	0.9632
70	0.1061	0.0584	0.2813	340	0.5194	0.1626	1.0072
80	0.1220	0.0646	0.3158	360	0.5478	0.1674	1.0500
90	0.1379	0.0704	0.3491	380	0.5755	0.1720	1.0915
100	0.1593	0.0760	0.3873	400	0.6038	0.1764	1.1330
110	0.1698	0.0813	0.4137	420	0.6313	0.1806	1.1731
120	0.1858	0.0864	0.4450	440	0.6586	0.1846	1.2124
130	0.2017	0.0913	0.4756	460	0.6856	0.1885	1.2511
140	0.2176	0.0960	0.5056	480	0.7124	0.1922	1.2890
150	0.2334	0.1004	0.5346	500	0.7390	0.1958	1.3264
160	0.2492	0.1048	0.5636	500	0.8683	0.2120	1.5043
170	0.2649	0.1089	0.5916	700	0.9926	0.2258	1.6700
180	0.2805	0.1130	0.6195	300	1.1126	0.2379	1.8263
190	0.2960	0.1168	0.6464	300	1.2290	0.2485	1.9745
200	0.3115	0.1206	0.6733	1000	1.3422	0.2581	2.1165

一片上各个器件的作用。因此,要求氧注入深度要大于N型层的厚度。有些材料缓冲层纯度不够高,载流子浓度甚至 $\geq 10^{14}/\text{cm}^3$, 它将使延伸在缓冲层上的栅柄引起极大的电容,因此,注 O^+ 深度应当愈深愈好,最好穿透 3—5 μ 的缓冲层,但这需要造价昂贵的兆电子伏特级的高能注入机,这对于半导体器件工作者是难办到的。经验证明:缓冲层质量在基本符合器件直流特性要求的情况下,将注 O^+ 浓度峰设计在 $N-N^-$ 界面处(即 $R_p = a$),即可一般满足平面型制管要求。举例说明如下:若要求 $R_p = a = 0.4\mu$, 查表 1 得知需要的注入能量为 260keV, 此时 $X_j = 0.8247\mu$ 。

假设一个氧原子补偿一个载流子,则为了使N型层中浓度为 $1-2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 的载流子得到补偿,需要在 $X_j = 0.8247\mu$ 的范围内,氧的平均浓度 \bar{N} 应 $\geq 1-2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$, 从而可求出需用的氧注入剂量为 $\phi = \bar{N} \cdot X_j = 1.65 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 。

由公式(2)可求出此时峰值浓度 $\hat{N} = 4.68 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 。

如果离子注入机的能量允许,不妨采用更高的注入能量,当采用高能注 O^+ 时,为了补充表面氧浓度的不足,可附加低能量注入,选用峰值浓度的位置离表面的距离小于二倍标准偏差的能量即可。由表 1 可知: $E_0 = 100\text{keV}$ 时, $R_p \approx 2\sigma_p$ 。为使表面浓度达到 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 则峰值浓度应为 $\hat{N} = N(0)/0.135 = 1.48 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 。需用剂量 $\phi = 2.89 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 。如果进行能量递减的多次 O^+ 注入,则注入剂量可以降低,表面氧浓度得到提高,对于降低栅柄电容将更为有利。

2. 注 O^+ 对栅柄电容影响的计算

GaAs MESFET 的亚微米栅条需要有一个面积足够大的栅柄,以便在其上键合引线

与管壳引线相连。通常台式器件是将栅柄延伸至缓冲层上(参看图1),栅柄引进的电容 C_p , 相当于栅柄金属以其在 GaAs 上的势垒空间电荷区 x_m 为间隙的一个平行板电容。即

$$C_p = \frac{\epsilon\epsilon_0 A_p}{x_m}, \quad (3)$$

$$x_m = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\phi_B - V_{gs})}{qN_D}}. \quad (4)$$

式中 ϵ ——GaAs 的介电常数,取 12.5,

ϵ_0 ——真空介电常数 $8.842 \times 10^{-14}(\text{f} \cdot \text{cm})$,

ϕ_B ——栅柄金属的势垒高度,Al 栅为 0.8V,

q ——静电电荷量 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$,

V_{gs} ——栅-源负偏压,

N_D ——缓冲层杂质浓度。

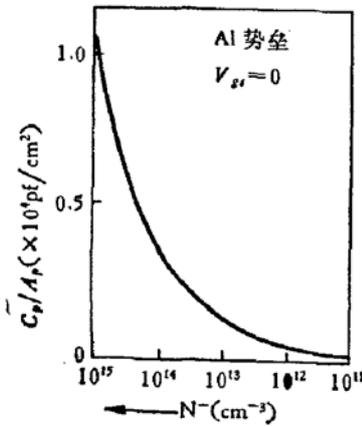


图5 单位栅柄面积电容随缓冲层浓度的变化

由公式(3)计算出零栅压下单位栅柄面积的电容 C_p/A_p

随缓冲层浓度 N_D 的变化示于图5。可以看出: 随着缓冲

层浓度的降低,栅柄电容迅速下降,质量差的缓冲层 $N_D = 10^{14} - 10^{15}/\text{cm}^3$, 栅柄电容很大,可以使器件微波特性严重恶化。优质缓冲层 $N_D \leq 10^{13}/\text{cm}^3$, 栅柄电容降至十分之一,如果 $N_D \leq 10^{11}/\text{cm}^3$, 则几乎完全没有栅柄电容。实验证明: O^+ 离子注入后的 GaAs, 电阻率很易达到 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, 即 N_D 仅为 $1.25 \times 10^{10}/\text{cm}^3$, 因此,本文所述注 O^+ 平面型器件,由于栅柄延伸在注氧 GaAs 上,可基本消除栅柄电容,这对于延伸栅柄面积特别大的 GaAs MESFET 功率器件和集成电路更为有利。

三、实验结果与讨论

在 $\langle 100 \rangle$ 晶向半绝缘 GaAs 衬底片上,用气相外延法,连续生长一层 N^- 缓冲层(杂质浓度为 $10^{14}/\text{cm}^3$) 和一层 N 型有源层(杂质浓度为 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$)。将器件的有源区盖上保护层,在此区域以外的所有 GaAs 面积上注入氧离子,注入能量为 160—380keV, 剂量为 $1-3 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 。在 500°C 退火 30 分钟,用两探针测量注氧区的击穿电压,均 $> 200\text{V}$, 初步认为已具备半绝缘性能。再用文献 [4] 中所述测量方法,测得注 O^+ 区的电阻率均 $\geq 5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 即载流子浓度已小于 $2.5 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 。

高阻隔离层虽已形成,但如果注 O^+ 后 GaAs 中存在大量晶格损伤或失配,某些缺陷还会成为金属杂质聚集的中心,它们存在于栅条势垒附近或栅柄之下,必将严重影响器件的电特性和可靠性。为了检查本实验条件下,氧离子注入的辐射损伤情况,我们进行了低能质子背散射测量,结果表明: 500°C 退火的样品,晶格辐射损伤已很小。

进而,用常规 GaAs MESFET 器件工艺,用接触式曝光,在被注氧区包围的有源区上(参看图2),制作了平面型 1μ 栅长的微波低噪声器件和 1.5μ 栅长的微波中功率器件,获得了完全正常的、与台式器件相当的直流特性(如饱和电流,跨导和夹断电压)。然而,光刻细栅条的成品率却大大提高了。特别是明显地改善了器件的电容参数和微波特性。

12GHz 微波低噪声平面器件和台式器件的典型测试结果列于表 2。(GaAs 材料相同)

表 2

注 O ⁺ 平面 器件				非注 O ⁺ 台式 器件			
编 号	C_{gs} (pf)	N_F (dB)	G_{NF} (dB)	编 号	C_{gs} (pf)	N_F (dB)	G_{NF} (dB)
01	0.91	4.64	4.3	1	1.12	5.42	3.0
02	0.98	4.32	5.2	2	1.19	6.5	2.0
03	0.96	4.64	5.0	3	1.13	5.75	2.3
04	0.80	4.12	3.7	4	1.04	5.31	3.2

注: C_{gs} 测试条件为 $V_{gs} = 0$, N_F 和 G_{NF} 的测试条件为: $f_0 = 12\text{GHz}$, $I_{ds} = 0.1I_{dss}$, $V_{SD} = 3\text{V}$.

从表 2 可以看出, 注 O⁺ 平面器件比非注 O⁺ 台式器件的栅电容小 0.2—0.25pf, 12GHz 下, 噪声系数低约 1—1.5dB, 最小噪声下的相应增益 G_{NF} 高约 1—2dB.

另外, 取 6GHz 微波中功率 GaAs MESFET 的一个小的模拟实验单胞器件进行测试, 结果列于表 3.

表 3

注 O ⁺ 平面 器件				非注 O ⁺ 台式 器件			
编 号	C_{gs} (pf)	P_0 (mw)	G_a (dB)	编 号	C_{gs} (pf)	P_0 (mw)	G_a (dB)
3-6	1.4—1.8	150	—	4-6	2.4—5.8	45	1.7
3-1		164	5.1	2-8		48	—
3-7		165	5.1	2-4		54	1.7
3-2		175	5.6	1-3		58	1.7

注: C_{gs} 测试条件为 $V_{gs} = 0$, P_0 与 G_a 测试条件为 $V_{SD} = 6\text{V}$, $V_g = -1.5\text{V}$, $P_{in} = 50\text{mw}$

可以看出注 O⁺ 平面功率器件比台式器件的栅电容要小 1—4pf, 输出功率和功率增益高约二倍。由于影响器件微波特性的因素复杂, 测试数据可因条件而异, 但是注 O⁺ 器件微波特性的改善趋势是肯定的。此实验单胞器件栅柄面积与栅条面积之比为 35 倍, 当工作频率进一步提高, 面积比更大时, 注 O⁺ 平面器件微波特性的改善可能更明显。

四、结 论

利用氧离子注入 GaAs 中, 可以形成高温 800°C 下仍稳定的半绝缘层。利用此特性成功地制作了一种新的平面型 GaAs MESFET, 大大降低了微波低噪声器件和微波中功率器件的栅柄电容, 获得了比通常的台式器件明显低的噪声和大的输出功率。此种平面型结构将有利于工作在各个频段的所有 GaAs MESFET 器件, 特别有利于栅柄数量多而大的功率器件、双栅器件和 GaAs 场效应单片集成电路。采用 400keV 中束流离子注入机, 进行能量递减的多重 O⁺ 离子注入, 可以满足制作平面型 GaAs MESFET 的要求。

平面器件结构有利于精细光刻, 它为采用低成本的普通接触式光刻制作边缘整齐的亚微米栅条提供了良好的条件。目前已可以得到 0.5—0.7 μ 宽的栅条。

本工作在离子注入方面得到北京师范大学低能核物理研究所和长沙半导体工艺设备研究所的协助、得到本所关久辉和宋马成同志的协助。制管实验工作由本所第一研究室102组和第五研究室501组完成、测试组的同志提供了数据,在此向有关同志表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Fukuta M., Suyama K., Suzuki H., Nakayama Y. and Ishikawa H., 1976 IEEE Int. Solid St. Circuits Conf. pp. 166—7.
- [2] Favennec P. N., Pelous G. P., Binet M. and Baudet P., Ion Implantation in Semiconductors and other Materials (Edited by Crowder B. L.), Plenum Press N. Y. p. 621 (1973).
- [3] Deveaud B., Palmier J. P., Favennec and Kar R. K., *Solid State Communications* **17**, 1253 (1975).
- [4] 邓先灿等,“氧离子注入砷化镓的研究”,河北半导体所技术资料 (1976).
- [5] Linhard J., Scharff M. and Schiott H. E., *Mat.-Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* **33**, No. 14 (1963).
- [6] Gibbons J. F., Johnson W. S. and Mylroie S. W., PROJECTED RANGE STATISTICS Semiconductors and Related Materials, 2nd Edition Dowden Hutchinson & Ross, Inc. Stroudsburg, Pennsylvania (1975).

A PLANAR TYPE GaAs FET

Deng Xian-can

(Hebei Institute of Semiconductors)

Abstract

A new planar type GaAs MESFET structure is presented in this paper. The results of calculations and experiments for making such a device by O^+ -implantation technique are described. It is shown that the planar structure has significant advantages in its microwave characteristics and manufacturing technology over the ordinary mesa type device.