

# GaAs 中的离子注入技术\*

李国辉 姬成周 刘伊犁 罗 晏 韩德俊

(北京师范大学低能核物理所 北京 100875)

**摘 要** 在 GaAs 集成电路和器件研制中,离子注入是关键技术之一.介绍了用离子注入 GaAs 形成 n 型和 p 型区,以及离子注入 p 型和 n 型 GaAs 形成绝缘层、形成  $n^+$  GaAs 深埋层等重要技术.对有关物理机制进行了讨论并提出了一些新见解;该离子注入新工艺已经应用于 GaAs 器件和集成电路的研制,获得了多种新型器件.

**关键词** GaAs 离子注入 白光快速退火

**分类号** TN305.3

## 1 引 言

GaAs 材料禁带宽度宽和迁移率高,是制作微波器件的主要材料.而且 GaAs 材料不能使用热扩散进行掺杂,因此 GaAs 离子注入技术的研究在 GaAs 微波器件及 GaAs 集成电路研制中具有重要的意义.

## 2 白光快速退火及优质 $Si^+$ 注入层的形成

GaAs 集成电路和器件制作中,一般选用 Si、S 等离子注入形成 n 型层, Mg、Be 等离子注入形成 p 型层,有关工作已经有了不少报道.但有关 S 离子注入形成陡峭分布, Si+As 双注入形成 n 型高浓度层,以及怎样形成高质量 n 型有源层的报道很少.这里提出了它们形成的条件.

### 2.1 Si、S、Mg、Be 注入 Si-GaAs 白光退火特性<sup>[1]</sup>

S、Si 注入 GaAs 在  $950^{\circ}\text{C} \sim 960^{\circ}\text{C}/5\text{ s}$  退火及 Be、Mg 注入 GaAs 在  $800^{\circ}\text{C} \sim 850^{\circ}\text{C}/5 \sim 10\text{ s}$  退火的条件下得到了最佳电特性. Si 的激活率在  $2 \times 10^{13}/\text{cm}^2$  以下剂量时,可达  $80\% \sim 100\%$ ; Be 注入 GaAs 在  $1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$  高剂量下,激活率可达  $100\%$ ; 而 Mg 注入 GaAs 在  $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$  剂量时,激活率仅有  $36\%$ .

S 注入 GaAs,一般热退火时很难得到陡

峭分布.但用白光快速退火时, Si、S、Be 注入 GaAs 在适当的注入和退火条件下皆可得到陡峭的分布. Mg 注入 GaAs 的剖面分布在快速退火中显示了较大的外扩散和尾部扩散.

透射电镜损伤分析说明, Si 低剂量和 Be 大剂量注入退火后,单晶恢复很好.而 Si 和 Mg 大剂量注入后产生了大量的二次缺陷,很难恢复.

### 2.2 用 Si+As 双注入形成 n 型高浓度层<sup>[2]</sup>

在器件研制中需要形成 n 型或 p 型高浓度层,由于自补偿效应等原因,在 GaAs 中 n 型层很难高于  $(3 \sim 4) \times 10^{18}/\text{cm}^3$  浓度. 选用 Si+As 双注入,使 Si 能更多地替 Ga 位,大大提高了载流子浓度.当选用  $Si^+$  适当注入和退火时,得到峰值载流子浓度为  $3 \times 10^{19}/\text{cm}^3$  的 n 型高浓度层.

### 2.3 高质量 $^{29}\text{Si}^+$ 注入层的形成<sup>[3,4]</sup>

国内材料  $^{29}\text{Si}^+$  注入后迁移率低.根据这个问题,课题组对低剂量注入层做了分析研究.与国内材料厂家合作,研究了材料生长条件与离子注入层特性的关系.研究结果表明,原料及设备清洁度对材料的质量有直接关系.另外单晶中当  $[\text{As}]/[\text{Ga}]$  原子比稍高时,离子注入层可以有较高的电激活.

研究发现,  $^{29}\text{Si}$  离子注入时受  $^{29}\text{BF}^+$  影响,使 Si 注入 GaAs 的阈值剂量升高,且使激活率从  $80\% \sim 100\%$  下降到  $60\%$  左右,迁移

率下降. 其机理是 B 形成  $B_{Ga}Si_{As}^+$  络合物对施主补偿的结果.

本工作提出了形成高质量  $^{29}Si^+$  注入层的条件为: 选用优质 Si-GaAs 材料, 消除注入时  $BF^+$  束流对  $^{29}Si^+$  束流的影响, 在  $950^\circ C \sim 960^\circ C$  5 s 白光快速退火的条件下可得到优质的 n 型层. 多次实验表明, 用此技术可稳定地将电激活率提高  $80\% \sim 100\%$ , 迁移率  $3\ 500\ cm^2/V \cdot s$  左右.

### 3 硼、氧离子注入 n(Si) 及 p(Be)-GaAs 薄层, 形成高阻层的技术及机理

在 GaAs 集成电路和器件研制中, 需要  $O^+$ 、 $B^+$  等注入 n 型和 p 型 GaAs, 形成高阻层, 来制作器件隔离.

本工作中从氧离子和硼离子注入 n、 $n^+$  层与 p、 $p^+$  层的薄层电阻  $\rho_s$  随退火浓度的变化规律, 认识到氧、硼离子注入, 可在 GaAs 禁带中间引入与损伤相关的深能级补偿导电层中的自由载流子, 在退火温度为  $500^\circ C \sim 700^\circ C$  时使导电层变为高阻层, 甚至是半绝缘层. 对于载流子浓度为  $1 \times 10^{17}/cm^3$  的 n 型层, 选用  $120\ keV$  叠加  $50\ keV$ , 剂量为  $5 \times 10^{12}/cm^2$  的氧离子, 使氧的浓度大体等于载流子的浓度, 注入后经  $600^\circ C/5\ s$  RTA 退火, 可获得接近半绝缘 GaAs 的薄层电阻. 为了减少跳跃导电的影响, 注入时样品温度保持在  $350^\circ C$  则可提高  $\rho_s$ , 使之达到  $(2 \sim 4) \times 10^8 \Omega$ . 实验结果可知, 硼的绝缘效果好于氧的隔离效果. 例如, 硼注入载流子浓度为  $5 \times 10^{17}/cm^3$  的 n(Si)-GaAs 层, 用  $2.5 \times 10^{12}/cm^2$  剂量注入经  $600^\circ C/5\ s$  RTA 后, 可获得薄层电阻  $\rho_s$  为  $4.67 \times 10^9 \Omega$  的高绝缘层. 对于浓度为  $4 \times 10^{17}/cm^3$  的 p(Be)-GaAs 层, 用  $1 \times 10^{13}/cm^2$  剂量的硼注入并经  $600^\circ C/5\ s$  退火, 也可获得薄层电阻  $\rho_s = 1.32 \times 10^9 \Omega$  的高绝缘层<sup>[5,6]</sup>.

硼离子注入除了损伤补偿机制外, 还存在有化学补偿机制. 在 GaAs 损伤恢复过程

中, 硼占镓位形成等电子缺陷  $B_{Ga}$ , 由于  $B_{Ga}V_{As}$  络合物与硅的相互作用, 促使硅占砷位形成受主  $Si_{As}$ , 补偿了 n(Si) 导电层中的自由载流子. 在光发光谱中,  $1.48\ eV$  峰,  $1.44\ eV$  峰以及  $1.325\ eV$  峰的强度变化规律说明了  $B_{Ga}$  缺陷浓度的增加导致  $Si_{As}$  及  $Ga_I$  浓度的增加. 可初步认为,  $1.325\ eV$  峰为  $B_{Ga}Si_{As}$  络合物发光峰<sup>[7]</sup>.

### 4 MeV $^{29}Si^+$ 离子注入半绝缘 GaAs<sup>[8]</sup>

在 GaAs 高速集成电路中需要制作 n 型埋层, 因此要选择 MeV 能量的高能离子注入. MeV 高能 Si 离子注入研究近期又有了进一步的发展. 本课题组主要研究了 MeV 离子注入的退火激活和多能量叠加注入等.

#### 4.1 白光快速退火和激活效率

在使用国产 KST-II 型碘钨灯快退火炉和高纯干氮气氛条件下, 获得最佳电特性的退火条件为  $950^\circ C/5\ s$ . 硅的施主激活率随注入剂量增大 ( $2\ MeV, 1.3 \times 10^{13} \sim 2 \times 10^{14}/cm^2$ ) 明显下降 ( $58\% \sim 21\%$ ). 在大剂量 ( $1.5 \times 10^{14}/cm^2$ ) 上激活率随离子能量增大 ( $0.6 \sim 7\ MeV$ ) 缓慢增大. 品质好的基片, 大剂量 ( $2 \times 10^{14}/cm^2$ ) 时的激活率仍可大于  $50\%$ .

#### 4.2 载流子分布

载流子分布明显比硅原子的分布浅. 最大载流子浓度在注入移位原子密集区域. 剩余缺陷主要是马蹄形位错环, 它们处在比载流子分布深的硅原子浓度峰区域. 硅能量与载流子浓度峰位置间, 可用简单的拟合函数表示:

$$E(\text{MeV}) = 1.268[X(\mu\text{m})]^{1.2}.$$

#### 4.3 提高硅的施主激活率

两步退火 ( $400^\circ C/24\ s + 980^\circ C/1 \sim 3\ s$ ), 使  $3\ MeV, 1 \times 10^{14}/cm^2$  注入样品的激活率达到  $80\%$ , 迁移率大于  $2\ 600\ cm^2/V \cdot s$ .

$P(2\ MeV, 1 \times 10^{14}/cm^2 + 3/3 \times 10^{14})$  和  $Si(3\ MeV, 1 \times 10^{14}/cm^2)$  共注入, 在合适的退火条件 ( $970^\circ C/10\ s$ ) 下, 激活率达到  $95\%$ ,

迁移率  $2\ 650\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . 室温下注入, 采用较小的束流密度(如  $0.03\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), 或适当升高衬底温度, 都有利于施主激活和损伤恢复<sup>[9]</sup>.

#### 4.4 施主激活的物理过程

综合电特性、物理测量和有关模拟计算, 可以认为是点缺陷-硅相互作用控制着硅的激活、载流子分布和剩余缺陷特征. 低温 ( $400\text{C}/24\ \text{s}$ ) 退火使注入层单晶恢复, 高温 ( $980\text{C}/1\sim 3\ \text{s}$ ) 退火使间隙硅原子, 在不断改善的晶格环境中, 主要通过替位 Ga 原子交换位置而激活. 注入产生的张应力(随剂量增大而增大)驱使硅占砷位, 自补偿效应产生大量的  $\text{Si}_{\text{Ga}}\sim\text{Si}_{\text{As}}$  对是 MeV 大剂量注硅激活率降低的主要原因. 激活能可作为硅激活难易程度的简明标度. 随剂量增大 ( $3\ \text{MeV}, 5\times 10^{12}\sim 1\times 10^{14}/\text{cm}^2$ ) 所需激活能增大 ( $0.38\sim 0.78\ \text{eV}$ ). 两步退火使相应的激活能减少了  $10\%\sim 20\%$ <sup>[10]</sup>.

#### 4.5 均匀 $n^+$ 深埋层制备及掩膜

均匀深埋有源层的制备, 需用多能量迭加注入. ( $4\ \text{MeV}, 4\times 10^{13}/\text{cm}^2+2.76\times 10^{13}+1.35\times 10^{13}+0.63\times 10^{13}$ ) 注入时, 在基片表面  $0.25\ \mu\text{m}$  以下产生了一个厚  $2.4\ \mu\text{m}$  的  $n^+$  埋层, 载流子浓度  $4\times 10^{17}/\text{cm}^3$ , 迁移率  $3000\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . 埋层以上单晶状态良好, 适合制作器件.

### 5 离子注入 GaAs 在器件上应用<sup>[11,12]</sup>

将以上结果应用于器件研制, 研制成功了多种特殊结构器件.

1) 具有横向梯度掺杂沟道的 GaAs MESFET 采用一种横向非均匀掺杂技术, 用离子注入制作沟道杂质横向梯度分布的自对准 MESFET.

2) MeV 高能  $\text{Si}^+$ 、 $\text{O}^+$  注入全离子注入垂直源区 MESFET<sup>[13]</sup> 选用  $6\ \text{MeV}, 1\times 10^{14}/\text{cm}^2$   $\text{Si}^+$  注入 Si-GaAs 形成  $n$  型埋层, 用  $0.6\ \text{MeV}\ 10^9/\text{cm}^2+1.3\ \text{MeV}\ 3\times 10^{10}/\text{cm}^2$   $\text{O}^+$  注入形成  $\text{Si}/n^+$  层, 制作了垂直源区 MESFET,

此器件结果优于 Cornell 大学类似器件结果, 并得到了同样栅宽二倍的导跨及功率输出.

3) GaAlAs/AsGa 超高增益 HBT 研制<sup>[14]</sup> 选用中科院物理所 MBE 材料,  $\text{Mg}^+$  注入退火后制作了很好的  $p$  型  $\Omega$  接触, 在  $W_B=0.1\ \mu\text{m}$  时, 制作出了  $\beta=1000$  高增益 HBT. 又选用  $\text{O}^+$  注入制作器件隔离层研制成功了平面型的功率 HBT.

4) 平面型 GaAs/AlGaAs 穿通型光电探测器<sup>[15]</sup> 选用中科院物理所分子束外延 GaAs/AlGaAs 材料, 6种能量的  $\text{O}^+$  叠加注入后制作了很好的器件隔离层, 从而形成了平面穿通型光电探测器, 使其光电增益提高近十倍, 漏电流下降了一个数量级. 得到了光电增益为 3 446 的高灵敏度光电探测器.

综上所述, 本工作对 GaAs 中的离子注入和白光快速退火技术进行了较全面的研究, 并在器件应用中取得了良好成果.

### 参 考 文 献

- 1 Li Guohui, Wei Dongping, Lou Yan et al. The Characteristics of Rapid Thermal Annealing of  $\text{Si}^+$   $\text{S}^+$  and  $\text{Be}^+$   $\text{Mg}^+$ . Proceedings of ICMPC'91 International Conference, 1991, 437~439
- 2 朱德华, 李国辉, 张通和等. Si, As 双注入 Si-GaAs 的 RTA 研究. 半导体学报, 1990, 11(2): 140~143
- 3 李国辉, 韩德俊, 陈如意等. 形成优质  $\text{Si}^+$  注入 Si-GaAs 层的研究. 半导体学报, 1994, 15(1): 40~47
- 4 Li Guohui, Wang Cehuan, Zhao Jie et al. Photoluminescence and Activation on Si-GaAs by  $\text{Si}^+$  Implantation and Following Rapid Thermal Annealing. NIM, 1996, B117: 112~116
- 5 Zhao Jie, Luo Yan, Li Gohui et al. Formation of High-resistivity on  $p$  Type ( $\text{Be}$ ) and  $n$  Type ( $\text{Si}$ ) GaAs by Oxygen Implantation. Proc. of ICMPC'91 International Conference, 1991, 153~157
- 6 Liu Yili, Luo Yan, Li Guohui et al. A Study of Boron Ion Implantation into  $\text{N}(\text{Si})$ -GaAs Layer. Proc. of International Conference on Solid and Electron Integrated Circuit, 1992, 521~523
- 7 刘伊犁, 罗 晏, 李国辉等. B 离子在  $\text{n}(\text{Si})$ -GaAs 层中的化学补偿效应. 半导体学报, 1996, 17(5): 360~364
- 8 Ji Chengzhou, Lu Wuxing, Li Guohui et al. MeV Ion

- Implantation and Application. Proc. of International Conference on Solid and Electron Integrated Circuit, 1995, 651~655
- 9 姬成周, 张燕文, 李国辉等. 两步快退火改善 InP(Fe)中 MeV 硅注入层的品质. 固态电子学与进展, 1995, 15(3): 281~286
- 10 Ji Chengzhou, Zhang Yanwen, Li Guohui et al. The Activation of MeV Si<sup>+</sup> Implants in Si-GaAs. Proc. of 7th Conference on Semi-Insulating III - V Materials, 1992, 105~108
- 11 Han Dejun, Chan K T, Li Guohui et al. A Si/n/sup<sup>+</sup> Structure in Semi-insulating GaAs Substrate by High Energy Implantation. NIM, 1995, B100(1):65~68
- 12 Li Guohui, Han Wei, Luo Yan et al. The Application of Ion Implantation in GaAs IC. International Conference on Solid and Electron Integrated Circuit, 1995, 399~401
- 13 Han Dejun, Chen K T, Li Guohui et al. A Novel MESPET Fabricated by a Simple Internal Interconnection Technique. IEEE Transactions on Electron Devices, 1995, 42(2):370~372
- 14 Wei Dongping, Li Guohui, Zhu Enjun et al. The Surface Recombination Effects on AlGaAs/GaAs HBT's with High Current Gain. Proceedings of ICMPC'91 International Conference, 1991, 441~445
- 15 李国辉, 韩德俊, 韩卫等. 高灵敏度穿通型异质结光电晶体管. 固体电子学与进展, 1995, 15(3):214~221

## Ion Implantation in GaAs

LI Guohui JI Chengzhou LIU Yili LUO Yan HAN Dejun

*(Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875)*

**Abstract** Optical and electrical properties of Si-GaAs wafers implanted with Si<sup>+</sup>, S<sup>+</sup>, Be<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, B<sup>+</sup>, O<sup>+</sup> have been investigated in this paper.

**Key Words** GaAs ion implantation rapid thermal annealing