

# 镓铝双质掺杂在制造快速晶闸管中的应用研究<sup>\*</sup>

王公堂<sup>†</sup> 刘秀喜

(山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)  
(2006 年 11 月 13 日收到 2007 年 2 月 12 日收到修改稿)

采用开管式 Al 乳胶源涂布与气相 Ga 相结合的技术, 实现了镓铝双质在 n 型 Si 中的均匀掺杂, 得到了 p 型半导体. 研究了镓铝双质掺杂的方法及其与器件性能的关系, 并讨论了机理. 利用扩展电阻法、四探针和晶闸管测试仪等手段, 测试了镓铝扩散 Si 片的杂质分布规律、薄层电阻  $R_s$  及快速晶闸管的多项参数. 利用该技术制造的快速晶闸管的关断时间  $t_{off}$  为 31.2—38.6  $\mu\text{s}$ , 开通时间  $t_{on}$  为 4.6—5.9  $\mu\text{s}$ , 通态峰值压降  $V_{TM}$  为 1.9—2.1 V. 实验和试用表明, 该掺杂技术能明显提高器件的综合性能、电参数一致性和成品率, 为制造快速晶闸管提供了一种可行的受主双质掺杂新工艺.

关键词: 快速晶闸管, 镓铝双质掺杂技术, 杂质浓度分布

PACC: 6170T

## 1. 引 言

对 Si 基材料而言, 普遍采用 III 族元素 B, Ga, Al 作为 p 型杂质源. 制造快速晶闸管的第一个关键工艺是用扩散法形成两个主要的 p 型阻断结, 通常采用受主单质或双质从 Si 晶片两边同时扩散形成一个 p-n-p 结构, 受主杂质可用闭管或采用开管系统掺入<sup>[1]</sup>. 采用真空闭管扩 Ga 工艺, 掺杂重复性差, 制造的器件电参数离散性大、电压较低, 该工艺周期长、成本高. 采用开管扩 Ga 工艺, 虽具有扩散参数易控制、器件的电参数一致性和高温特性好的优点, 但使用该方法制造高压快速晶闸管很困难. 采用硼铝涂层扩散工艺制造的器件具有电参数分散性大、动态特性不理想等缺点<sup>[1-3]</sup>. 针对上述几种受主掺杂工艺的不足, 我们开展了快速晶闸管的 p 型双质掺杂技术的应用研究. 在电力半导体器件制造中, 为协调器件的阻断特性、通态特性和关断特性三者之间的矛盾, 应加强工艺措施<sup>[4]</sup>. 经长期研究和试验, 一种开管式镓铝双质掺杂新技术获成功, 即为 Al 乳胶源涂布与气相 Ga 相结合的受主双质掺杂方法. 该方法试用于 KK200 型快速晶闸管生产中, 明显提高了器件的电参数一致性和耐压水平, 快速参数得

到改善, 产品合格率和优品率显著提高.

## 2. 镓铝双质掺杂技术的理论依据

B, Ga, Al 是三种常用的受主杂质, B 在 Si 中掺杂的表面浓度为最高, Ga 次之, Al 最低. 它们在 Si 中的扩散系数也明显不同, B 扩散速度慢, Al 扩散速度最快, Ga 的扩散速度介于 B 和 Al 之间. 在同样掺杂条件下, B, Ga, Al 在  $\text{SiO}_2$  中的扩散速度相差很大, B 的扩散速度最慢, Ga 的较快, Al 的最快, 故 Ga 和 Al 能穿透  $\text{SiO}_2$  向 Si 中扩散, 而 B 能被  $\text{SiO}_2$  层掩蔽. 这三种杂质虽均为等价的 III 族元素, 但它们在 Si 中的电离能不一样. 掺入 Si 中的 Ga 杂质原子, 在室温下虽没有全部电离, 但在高温下能全部电离, 这有助于器件在高温工作时的注入比、迁移率和电流放大系数的增加. 故利用 Ga 掺杂制备的器件, 其高温特性优于利用 B, Al 掺杂制备的器件, 并且金属 Ga 源对 Au, Cu 具有吸附剂作用<sup>[5]</sup>. 三种元素在 Si 中的掺杂浓度分布规律各有不同, 如 B 杂质浓度分布陡峭, 易造成电参数分散性大; Al 浓度分布较缓, 有利于提高器件的耐压能力; 开管扩 Ga 的杂质浓度分布具有一平缓段, 这有助于提高器件的电参数一致性.

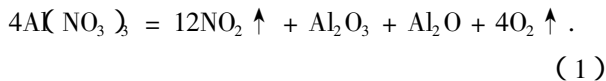
<sup>\*</sup> 山东省自然科学基金(批准号: Y2003A01)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: wanggt@sdu.edu.cn

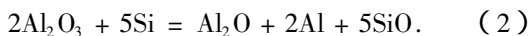
依据上述三种受主杂质在 Si 中的扩散行为和特性,并从制造快速晶闸管理论和工艺途径分析,若采用单质 B (Ga)或硼铝双质掺杂工艺均无法获得较理想的杂质浓度分布,达不到提高快速器件的电压水平、电参数一致性和综合性能的要求,只有镓铝双质组合掺杂较好. 镓铝双质掺杂工艺可吸取 Ga 和 Al 杂质的各自优点,克服不足,再适当调节和控制扩散条件,可达到制造快速晶闸管的目的. 根据上述分析和要求,我们研究和设计了开管式镓铝双质掺杂工艺. 该工艺充分利用了 Ga 在 Si 中的表面浓度高于 Al 的浓度, Ga 杂质分布有一平缓段,具有杂质浓度易控制和高温特性好的优点,又利用了 Ga 在 SiO<sub>2</sub> 中的扩散系数大,能实现 Ga 在 SiO<sub>2</sub> 系扩散,可消除裸 Si 系扩 Ga 产生的弊病,因而有利于提高快速器件的电参数一致性和综合性能<sup>[6]</sup>. 该工艺还利用了 Al 的扩散系数远大于 Ga 的扩散系数, Al 浓度分布较缓等优点,以达到所要求的结深,缩短扩散周期,同时可减少两个 p-n 结前沿的浓度梯度,使 p-n 结空间电荷层向 p 区展宽更大,降低了空间电荷区的电场强度,有利于提高快速晶闸管的耐压水平<sup>[7]</sup>.

### 3. 掺杂机理

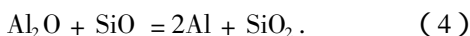
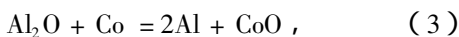
镓铝双质掺杂分为 Al 预沉积、Ga 预沉积和双质再分布,三个阶段在同一台扩散炉中连续完成. 将 Al(硝酸铝)乳胶源均匀地涂布在 n 型 Si 片上,经高温后在表面形成掺杂氧化物. 这有两个作用,一是在 Si 面形成淀积氧化层,二是提供 Al 杂质扩散源. Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 先发生以下热分解反应:



分解生成的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的蒸汽压很低, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 不足以参与扩散,但在高温下它与 Si 的作用可生成 Al<sub>2</sub>O 和 Al<sup>[8]</sup>,即发生以下反应:



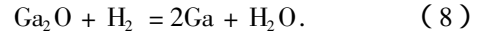
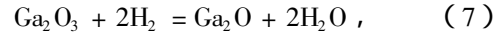
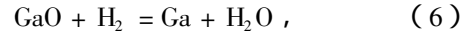
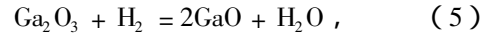
Al<sub>2</sub>O 的蒸汽压稍高,高温下 Al<sub>2</sub>O 能被过渡金属(如 Co, Ni 等)和 Si 的低价氧化物还原,而生成 Al 原子,例如,



生成的 Al 杂质在高温下向 n 型 Si 中扩散而形成 p<sup>-</sup>型层. 通过改变乳胶源中的 Al 源含量、涂布胶膜厚

度、扩散温度和扩散时间,可控制 Al 淀积的表面浓度和结深.

Al 预沉积后接着进行 Ga 预沉积, Ga 源为粉状 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub> 既为 Ga 源的反应气体,又是 Ga 源的输运气体. 800 °C 以上时, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 H<sub>2</sub> 发生以下反应:



上述化学反应最终生成的气态 Ga 穿过(扩散) SiO<sub>2</sub> 层向 p<sup>-</sup>型 Si 中扩散,再形成 p<sup>+</sup>型薄层. 通过合理调节片温、源温、H<sub>2</sub> 气流量和通源时间,可控制气态 Ga 的产量. 一般情况下,固定前三者,只改变通源时间,就可达到扩 Ga 的表面浓度.

镓铝分段掺杂后,再在 N<sub>2</sub> 气氛保护下进行杂质再分布,最终的表面浓度和结深可通过调节和控制扩散温度及时间达到要求. 因 Ga 杂质的表面浓度比 Al 高,故再分布后的表面浓度主要由 Ga 决定,而 Al 的扩散系数远大于 Ga,则由 Al 决定其扩散深度.

## 4. 实 验

### 4.1. 样品制备

实验采用[111]晶向的 n 型 Si 片,其电阻率为 60—70 Ωcm,片厚为 380 μm. 先对 Si 片进行严格化学清洗,使 Si 片表面洁净、干燥. 所用设备为三段控制单温区扩散炉,炉内装有两端均为磨口的特制石英管. 采用旋转涂膜法将 Al 乳胶源均匀涂布在 Si 片的正、反面<sup>[9]</sup>,经预烘后将 Si 片立放在石英舟上,再推入扩散炉的恒温区,向石英管内通入小流量(50 ml/min) N<sub>2</sub> 气作为保护气氛. 经高温在 Si 片表面形成 Al 掺杂氧化物,再通过化学反应生成 Al 原子,在 1250 °C 时, Al 杂质向 Si 中扩散 6—8 h,形成 p<sup>-</sup>型层. Al 预沉积后,停 N<sub>2</sub> 气改为通入高纯 H<sub>2</sub> 气,将管道内的残余 N<sub>2</sub> 气排净后,接着进行 Ga 预沉积. 源温区的温度调节恒定后,利用一种装置将盛有 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的源舟准确地送入源温区. Ga 预沉积条件如下:片温为 1180—1230 °C,源温为 950—1000 °C, H<sub>2</sub> 气流量为 120 ml/min,时间为 60 min. 通过 H<sub>2</sub> 与 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的化学反应而生成 Ga 原子,气态 Ga 穿过 SiO<sub>2</sub> 膜向 p<sup>-</sup>型 Si 中扩散再形成 p<sup>+</sup>型层. 然后在 1260 °C 和 N<sub>2</sub> 气

氛保护下进行杂质再分布.上述全部的扩散过程是在同一炉中经高温连续完成,最终得到镓铝双质掺杂的 p 型扩散层.然后再经磷扩、光刻、电极制备、电子辐照、封装等工序,得到快速晶闸管.

## 4.2. 测 试

用 D41-4 型四探针测试仪测量样品的薄层电阻  $R_s$ ,采取磨角染色镜检法测量杂质扩散深度,用扩展电阻法测量杂质分布,用晶闸管测试仪等仪器测量快速晶闸管的多项电参数.

## 5. 实验结果及讨论

### 5.1. 杂质分布规律

利用扩展电阻法对镓铝扩散后的 Si 片进行测量,得到的杂质浓度分布曲线如图 1 所示.该曲线可分为三段:A 段为 Ga 的饱和段(又称 Ga 的平缓段),约为 20—22  $\mu\text{m}$ ,表面浓度为  $10^{17}$ — $10^{18}/\text{cm}^3$ ;B 段为 Ga 的扩散段,浓度梯度较大;C 段为 Al 的扩散段,浓度较低,浓度分布较缓.高压快速晶闸管的受主掺杂,多数为深结(65—80  $\mu\text{m}$ )扩散.经分析对比发现,镓铝双质掺杂的再分布近似为高斯扩散规律.快速晶闸管管芯的纵向杂质浓度分布如图 2 所示.从图 2 中可以看出,两个 p 型区的杂质浓度分布是对称的.

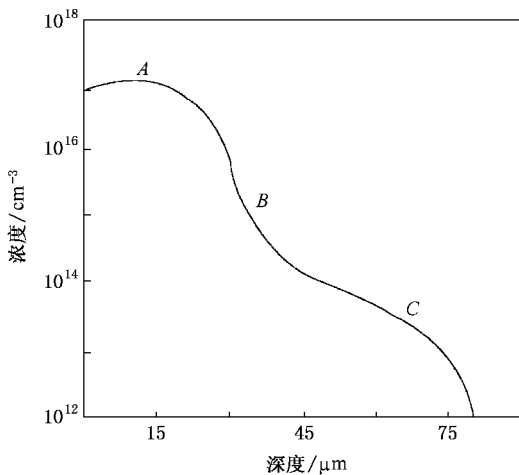


图 1 开管镓铝扩散后 Si 片中的杂质浓度分布曲线

### 5.2. 扩散均匀性和重复性

采用 D41-4 型四探针测试仪,对镓铝扩散后 Si

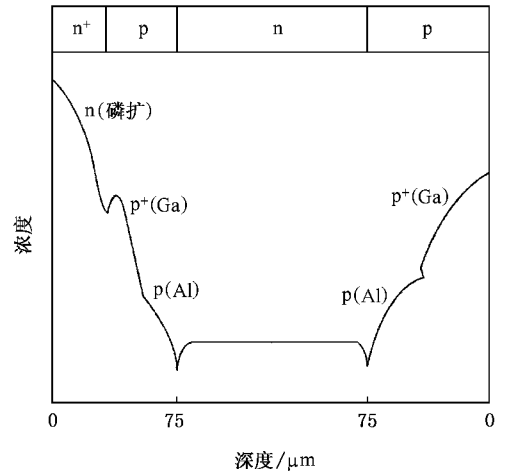


图 2 管芯纵向杂质浓度分布

片的薄层电阻  $R_s$  进行了测量.表 1 列出了 Si 片的正、反面中心点处和周边对称的 4 个点(边点 1—边点 4)处的薄层电阻测量值.从表 1 中可明显看出,同一 Si 片上及片与片之间的薄层电阻差值很小,这说明该工艺的扩散均匀性、重复性和可控性较好.因 p 型扩散区均匀,p-n 结平坦,故有利于提高 Si 器件的耐压能力和动态特性.

表 1 镓铝扩散 Si 片的薄层电阻  $R_s$  的测量值(单位为  $\Omega$ )

样 品	中心点	边点 1	边点 2	边点 3	边点 4	平均值
1 号正面	78.8	78.8	77.4	79.2	79.2	78.7
1 号反面	78.3	77.9	78.3	77.9	77.4	78.0
2 号正面	72.9	74.3	74.3	75.6	73.8	74.2
2 号反面	73.8	73.8	72.9	74.3	74.7	73.9
3 号正面	81.0	80.1	78.8	79.2	81.0	80.0
3 号反面	80.1	79.2	81.5	79.2	78.6	79.7

### 5.3. 关断时间和通态峰值压降的控制

关断时间  $t_{\text{off}}$  和通态峰值压降  $V_{\text{TM}}$  是快速晶闸管的两个重要参数,两者存在相互矛盾和制约的关系.图 3 是快速晶闸管的  $t_{\text{off}}$  与  $V_{\text{TM}}$  的关系曲线.少数寿命  $\tau_p$  的控制是制造快速晶闸管的关键之一.因 Ga 源对金属(Au, Cu)杂质具有吸除作用,且掺杂全过程是在同炉连续完成,并有  $\text{SiO}_2$  膜、 $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$  的保护,可防止杂质污染,高温过程结束后又采取缓慢降温等措施.这些都有利于提高少数寿命,也是减小  $V_{\text{TM}}$  的重要途径之一,从而可改善器件的参数  $t_{\text{off}}$  和  $V_{\text{TM}}$ .表 2 是不同批次镓铝扩散 Si 片的少数寿命测

量值.从表 2 可看出,少子的寿命长、均匀性好.此外,对镓铝掺杂制备的管芯,可采用电子辐照法来控制关断时间,通过调节电子辐照剂量和时间来控制管芯少子寿命的长短,以达到快速晶闸管所要求的  $t_{off}$  和  $V_{TM}$ .图 4 给出  $t_{off}$  和  $V_{TM}$  随电子辐照剂量  $\phi$  的变化关系.为使器件性能稳定,提高击穿特性,电子辐照后可在真空或保护气氛中进行退火处理<sup>[10]</sup>.

表 2 镓铝扩散 Si 片的少子寿命  $\tau_p$  的测量值

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tau_p/\mu s$	10	10	10	10	7	9	10	8	8	9

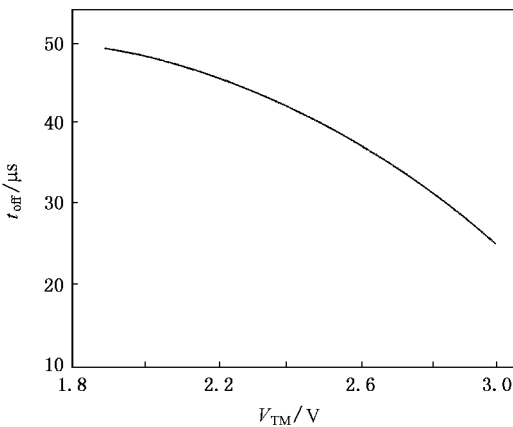


图 3  $t_{off}$  与  $V_{TM}$  的关系曲线

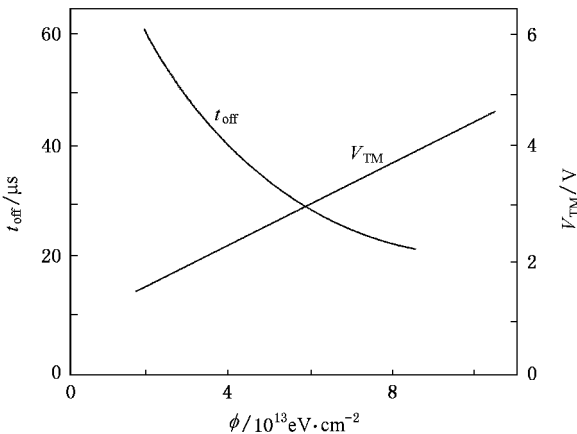


图 4  $t_{off}$  和  $V_{TM}$  随电子辐照剂量  $\phi$  的变化关系

5.4. 断态参数

镓铝掺杂工艺具有以下优点:1)  $SiO_2$  层覆盖 Si 表面,具有良好的钝化和保护作用;2) 镓铝掺杂全过程是在  $SiO_2$ ,  $H_2$  (扩 Ga 阶段),  $N_2$  保护下,在同一扩

散炉中连续完成,避免了多次升温 and 降温过程,减少了杂质污染,也减少了晶格缺陷;3) p 区扩散均匀, p-n 结平坦, Al 杂质分布较缓.故利用镓铝掺杂制备的快速器件具有漏电流小、电压水平较高,正、反向重复峰值电压一致性好,呈硬特性.断态重复峰值电压  $V_{DRM}$  和反向重复峰值电压  $V_{RRM}$  可达到 1500—1800 V,比闭管扩 Ga 高 500 V 左右,比开管扩 Ga 高 350 V 左右.在室温(25 °C)下,断态重复峰值电流  $I_{DRM}$  和反向重复峰值电流  $I_{RRM}$  均为 0.1 mA,高温(100 °C)下  $I_{DRM}$  和  $I_{RRM}$  测试为 1.6—3.5 mA.

5.5. 触发参数、维持电流和通态峰值压降

触发参数的大小主要取决于短基区平均电阻率  $\rho$  的大小,即决定于次表面浓度的高低.因开管镓铝扩散的浓度分布具有一平缓段,二扩深度(磷扩深度 18—20  $\mu m$ )正落在此段,一旦 Si 片抛光或二扩结深有较小变化,次表面浓度不会发生明显变动,故门极触发特性和门极参数一致性好,  $V_{TM}$  较小,一致性也好.表 3 列出了采用开管镓铝扩散技术制备的快速晶闸管的门极触发电压  $V_{GT}$ 、门极触发电流  $I_{GT}$ 、维持电流  $I_H$  和  $V_{TM}$  的测量值(表中 K1—K8 为快速晶闸管的编号).

表 3 快速晶闸管的  $V_{GT}$ ,  $I_{GT}$ ,  $I_H$  和  $V_{TM}$  的测量值

样品编号	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
$V_{GT}/V$	1.75	1.67	1.79	1.63	1.65	1.63	1.58	1.60
$I_{GT}/mA$	39	37	39	29	32	39	35	30
$I_H/mA$	29	32	33	25	30	30	26	24
$V_{TM}/V$	2.11	1.93	2.05	2.02	2.11	1.93	2.06	2.18

5.6. 快速参数

关断时间  $t_{off}$  和开通时间  $t_{on}$  是快速晶闸管的两个重要快速参数,表 4 列出了采用开管镓铝扩散技术制备的快速晶闸管的  $t_{off}$ ,  $t_{on}$  的测量值.从表 4 可以看出,不同管子的  $t_{off}$ ,  $t_{on}$  的一致性很好.在快速参数方面,该工艺与开管扩镓工艺相当,但优于闭管扩镓工艺.

表 4 快速晶闸管的  $t_{off}$  和  $t_{on}$  的测量值

样品编号	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
$t_{off}/\mu s$	33.5	38.6	35.6	37.3	35.8	31.6	36.9	31.2
$t_{on}/\mu s$	5.1	5.3	4.7	5.0	5.9	4.8	4.7	4.6

### 5.7. 动态参数

器件承受  $dV/dt$  (断态电压临界上升率) 和  $dI/dt$  (通态电流临界上升率) 的能力受许多因素影响, 其中与一次 p 型扩散有关. 因镓铝双质掺杂具有良好的扩散均匀性和重复性, 扩散参数有较高的可调性和可控性, 该工艺易于提高或减小次表面浓度, 以达到提高动态参数  $dV/dt$  和  $dI/dt$  的目的. 采用该工艺制造的 KK200 型快速晶闸管的  $dV/dt$  为  $500 \text{ V}/\mu\text{s}$ ,  $dI/dt$  为  $200 \text{ A}/\mu\text{s}$ .

## 6. 结 论

采用开管式镓铝双质扩散技术, 在 n 型 Si 中实现了高均匀掺杂, 得到了杂质分布较理想的 p 型半导体, 证实镓铝组合是一种良好的 p 型杂质源. 该项掺杂技术用于制造快速晶闸管, 能提高电参数一致性和耐压水平, 改善开关特性和综合性能, 明显提高了合格率和优品率, 且工艺简单、周期短、成本低. 因此, 该工艺优于其他受主掺杂方法, 为电力半导体器件提供了一种可行的受主双质掺杂新工艺.

- 
- [ 1 ] Liu X X , Zhao F X , Sun Y 1995 *Chin. J. Semiconduct.* **16** 235 ( in Chinese ) [ 刘秀喜、赵富贤、孙 瑛 1995 半导体学报 **16** 235 ]
- [ 2 ] Sun Y 2002 *Chin. J. Semiconduct.* **23** 746 ( in Chinese ) [ 孙 瑛 2002 半导体学报 **23** 746 ]
- [ 3 ] Ghoshagore R N 1979 *Solid State Electron.* **22** 877
- [ 4 ] Wang C L , Gao Y , Ma L , Zhang C L , Kim E D , Kim S C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2296 ( in Chinese ) [ 王彩琳、高 勇、马 丽、张昌利、金垠东、金相 2005 物理学报 **54** 2296 ]
- [ 5 ] Momma N , Taniguchi H , Ura M , Ogwa T 1978 *J. Electrochem. Soc.* **125** 963
- [ 6 ] Liu X X , Sun Y 1997 *Acta Phys. Chem. Sin.* **13** 153 ( in Chinese ) [ 刘秀喜、孙 瑛 1997 物理化学学报 **13** 153 ]
- [ 7 ] Xu C X 1987 *Endurance and Surface Insulated Technology of High Voltage Silicon Semiconductor Device* ( Beijing : Mechanical Industry Press ) p85 ( in Chinese ) [ 徐传骧 1987 高压硅半导体器件耐压与表面绝缘技术 ( 北京 机械工业出版社 ) 第 85 页 ]
- [ 8 ] Liu X X , Sun Y , Li Y G 2004 *Chin. J. Semiconduct.* **25** 110 ( in Chinese ) [ 刘秀喜、孙 瑛、李玉国 2004 半导体学报 **25** 110 ]
- [ 9 ] Guo D Y , Wang Y B , Yu J , Gao J X , Li M Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5551 ( in Chinese ) [ 郭冬云、王耘波、于 军、高俊雄、李美亚 2006 物理学报 **55** 5551 ]
- [ 10 ] Huang W , Zhang L C , Gao Y Z , Jin H Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2254 ( in Chinese ) [ 黄 伟、张利春、高玉芝、金海岩 2005 物理学报 **54** 2254 ]

# Research of the Ga and Al double-impurity doping technique for making fast switching thyristor<sup>\*</sup>

Wang Gong-Tang<sup>†</sup> Liu Xiu-Xi

( College of Physics and Electronics , Shandong Normal University , Jinan 250014 , China )

( Received 13 November 2006 ; revised manuscript received 12 February 2007 )

## Abstract

We describe a novel technique for producing the p-type semiconductor. The homogeneous impurity doping of Ga and Al in the n-type silicon wafer is achieved by means of the combination of two technical processes namely aluminum emulsion coating and vaporizing Ga. This Ga-Al double-impurity doping technique, as well as its effect on the quality of the produced semiconductor devices, is investigated theoretically and tested in practice. The principle of the doping technique is also discussed in detail. By using SRP, four-probe needle and thyristor analyzer, we have examined the Ga-Al impurity concentration distribution within the silicon wafer, thin layer resistance  $RS$ , and other useful parameters of the fast switching thyristors made by this technique. The turn-off time of the fast switching thyristors,  $t_{\text{off}}$  is 31.2—38.6  $\mu\text{s}$ , turn-on time  $t_{\text{on}}$  is 4.6—5.9  $\mu\text{s}$ , and the forward voltage drop  $V_{\text{TM}}$  measured is 1.9—2.1 V. Both experiment and some real applications indicated that this technique may obviously improve the semiconductor device in the overall performance, the electrical parameter uniformity and the end product rate. It provides a feasible technique for making fast switching thyristors.

**Keywords** : fast switching thyristor, Ga-Al double-impurity doping technique, distribution of impurity concentration

**PACC** : 6170T

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China ( Grant No. Y2003A01 ).

<sup>†</sup> E-mail : wanggt@sdu.edu.cn