第 59 卷 第 3 期 2010 年 3 月
1000-3290/2010/59(03)/1964-06

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 59, No. 3, March, 2010
©2010 Chin. Phys. Soc.

镓铝双质掺杂提高晶闸管性能的机理研究*

王公堂† 刘秀喜

(山东师范大学物理与电子科学学院,济南 250014)

(2009 年 5 月 6 日收到;2009 年 10 月 20 日收到修改稿)

依据 Ga,A1 在 Si 和 SiO_2 中的扩散行为和特性,采用 SiO_2/Si 系统,利用磁控装置精确控制 Ga 掺杂量,实现镓铝双质掺杂在同一扩散炉中经一次高温连续完成. 该项掺杂技术能实现 Si 中的高均匀掺杂,扩散参数具有良好的重复性和一致性,可获得较理想的杂质浓度分布. Ga,Al 与 Si 的共价半径相接近,高温后又采取缓慢降温等措施,能明显减少晶格缺陷,提高少子寿命,降低压降. 研究了受主双质掺杂与晶闸管参数之间的关系,并对镓铝双质掺杂提高晶闸管性能的机理进行了深入的分析与讨论. 研究表明,镓铝双质受主掺杂有利于提高晶闸管的耐压水平和浪涌能力,能明显改善电流特性、触发特性和动态特性,优于其他受主掺杂技术.

关键词: 镓铝双质掺杂, 机理, 晶闸管, 性能

PACC: 6170T

1. 引 言

在电力半导体器件中,要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[1],其中主要措施是采用先进的受主掺杂工艺. 开管式镓铝双质掺杂技术用于普通高压晶闸管(KP)和快速晶闸管(KK)的生产,能明显提高晶闸管的耐压水平和浪涌能力,改善电流特性、触发特性和动态特性,并显著提高器件的电参数一致性和成品率. 根据元素在 Si 中的扩散行为和特性,为获得较理想的杂质浓度分布和提高器件的综合性能,采用镓铝双质掺杂较好,该项技术是指在同一扩散炉中经一次高温连续完成铝、镓预沉积和再分布的 p 型扩散工艺.

目前,关于镓铝双质掺杂技术能明显改善器件性能和提高电参数一致性的机理研究未见系统报道. 我们依据开管扩散系统的特征和镓铝双质掺杂同炉连续完成的特点,Ga 在 SiO_2/Si 系掺杂的特色[2],实验结果和器件应用[3],并以 KP 晶闸管为例,分析了镓铝双质掺杂与电参数之间的关系,研究和讨论了该项掺杂技术提高器件性能的机理,有利于器件制造工艺的理论分析及掺杂技术的应用、提高和发展.

2. 掺杂工艺和测量方法

开管扩散装置是由高温扩散炉、双磨口石英管、石英舟、源舟、内扩管、氢气 H_2 和氮气 N_2 管路等组成. 选取[111]晶向、电阻率为 80—150 Ω·cm 的 n 型 Si 片,用Ⅰ号洗液(氨水∶双氧水∶纯水 = 1∶2∶5)和Ⅱ号洗液(盐酸∶双氧水∶纯水 = 1∶2∶8)进行严格化学清洗后,采用旋转涂膜法[4](涂胶机转速为 3000 r/min,时间为 15—20 s,膜厚约为 350—400 nm),将自制的掺铝(硝酸铝)二氧化硅乳胶源(简称铝乳胶源)均匀的涂布在 Si 片的正、反双面,预烘后立放在石英舟上,再将舟推入扩散炉的恒温区,在 1250 ℃和 N_2 保护下,预扩 A1 为 8—10 h(同时在 Si 表面形成淀积 SiO_2 膜),高温下 A1 源发生一系列的化学反应而生成 A1 原子,向 n 型 Si 中扩散而形成 p^- 型层. 接着进行 Ga 预沉积,Ga 源为粉状 Ga_2O_3,H_2 是 Ga 源的反应和输运气体. 扩 Ga 条件:片温为 1180—1210 ℃,源温为 950—1000 ℃,H_2 流量为 150—300 ml/min,通源时间为 50—80 min. H_2 从源舟上方通过,高温下 Ga_2O_3 与 H_2 发生系列的化学反应而生成 Ga 原子,Ga 向 p^- 型层扩散再形成 p^+ 型层,且 p^+ 层的深度小于 p^- 层的深度,然后

* 山东省自然科学基金(批准号:Y2003A01)资助的课题.

† E-mail: wanggt@sdnu.edu.cn

在 1260 ℃和 N_2 保护下，杂质再分布 30—35 h. 上述三个阶段均在同一台扩散炉中经一次高温连续完成，最终获得 p 型半导体. 再经抛光、热氧化、光刻、磷扩、电极制备、烧结和封装等工序，制成晶闸管.

扩散样品用D41-4型四探针测量薄层电阻 R_s，用磨角染色镜检法测量杂质扩散深度 x_j，利用扩展电阻法(SRP)测量样品的杂质浓度分布，样品经特殊处理后用 SBT-5 型同步示波器测量少子寿命 τ_p，用晶闸管测试仪等测量晶闸管的多项电参数.

3. 镓铝掺杂提高器件性能的机理分析与讨论

3.1. 镓铝掺杂与硅器件耐压

以晶闸管物理原理为基础，从器件耐压水平、触发特性、通态压降、浪涌能力和动态特性方面，研究和分析镓铝双质掺杂提高器件性能的机理及与电参数的关系. 器件的击穿特性及 *J-V*(电流密度-电压)、*J-T*(电流密度-温度)特性，直接关系到器件的工作范围和可靠性[5]. 提高硅器件击穿特性的途径，除考虑材料结构、基区宽度、温度和表面性能之外，主要是采用先进的掺杂工艺来提高器件的耐压能力.

3.1.1. 镓铝均匀掺杂有利于提高器件的耐压能力

p-n 结的雪崩电压与掺杂区的电阻率大小及其均匀性有关，若掺杂均匀性较差，会导致掺杂区的电阻率不均匀，进而造成扩散深度不平坦和电流分布不均匀，显然要影响到器件的耐压能力，甚至发生低击穿.

铝扩散的均匀性与铝乳胶源涂布质量有关，涂层与 Si 片的结合强度(或附着力)是涂层材料性能的主要指标. 涂层的残余应力在涂层内存在大量的弹性能，并作用于涂层与 Si 片的界面上，若弹性能很大，会造成涂层出现裂纹、开裂或剥落[6]. 为减小涂层的残余应力，铝乳胶源涂布采用旋转涂膜法，即匀胶机在较高速度和一定时间下，在 Si 片表面形成牢固且厚度适宜和均匀性好的铝乳胶层. 同样，在 Ga 的预沉积时，气态 Ga 以极快的速度穿过(扩散) SiO_2 层，在 SiO_2-Si 界面均匀分布，且 Ga 在 SiO_2，SiO_2-Si 界面及 Si 中的浓度分布具有连续性. 因此，在高温下，Ga，A1 能均匀地向 Si 中扩散；又因采取 Ga 在 SiO_2/Si 系扩散，消除了 Ga 在裸 Si 系(Si 面无 SiO_2 膜)扩散产生的弊端[2]. 用 D41 – 4 型四探针对样品中心点和周边对称四个点(边点 1—4)处的薄层电阻 R_s 进行测量，R_s 均匀性很好，表 1 和表 2 分别给出两种扩散工艺的 R_s 测量值. 样品用磨角染色镜检法测试，p-n 结平坦. 说明镓铝掺杂有利于提高器件的耐压能力，优于硼扩散和硼铝扩散.

表 1　镓铝扩散的样品薄层电阻 R_s 测量值(单位 Ω/□)

样品号	中心点	边点 1	边点 2	边点 3	边点 4	平均值
1	73.2	72.5	74.3	72.6	74.1	73.3
2	75.1	73.6	75.3	74.6	73.4	74.4
3	74.0	74.4	74.1	73.6	73.7	74.0
4	72.7	72.6	73.4	72.8	72.4	72.8
5	72.2	71.8	71.3	72.2	72.3	72.0

表 2　硼铝扩散的样品薄层电阻 R_s 测量值(单位 Ω/□)

样品号	中心点	边点 1	边点 2	边点 3	边点 4	平均值
1	35.4	24.3	28.3	50.6	24.8	32.7
2	26.7	16.6	46.2	29.9	24.5	28.8
3	75.3	62.7	59.3	63.2	73.5	66.8
4	30.2	27.1	27.2	21.5	32.6	27.7
5	20.0	20.3	18.7	18.4	25.6	20.6

3.1.2. 镓铝掺杂能减少晶格缺陷有利于改善器件的击穿特性

Ga 的共价半径(0.126 nm)和 A1 的共价半径(0.118 nm)均与 Si 的共价半径(0.112 nm)相接近，Ga 和 A1 掺入 Si 中虽也会产生一些扩张应力，但远小于 B(共价半径为 0.079 nm)在 Si 中的压缩应力，前者比后者能明显地减少晶格缺陷. 掺杂全过程是在 H_2(预沉积)、N_2 和 SiO_2 的保护下，在同一台扩散炉中经一次高温连续完成，不仅防止了多次升温和降温过程，而且也减少了有害杂质污染；高温过程结束后，又采取了缓慢降温法，有利于晶格恢复；这些措施能显著减少晶格缺陷. 半导体器件体内的最大电场强度位于 p-n 结处，雪崩击穿主要受 p-n 结附近电场的影响，缺陷处不仅电场分布不均匀，而且耐压也很低，易发生击穿；因为镓铝双质掺杂有利于减少体内缺陷，使电场分布均匀，所以该工艺能明显改善器件的击穿特性.

3.1.3. 镓铝浓度分布较缓有利于提高器件的电压水平

A1，Ga 分段掺杂及杂质再分布，能较好地控制基区掺杂量和降低结前沿的杂质浓度梯度，也就是更好地调整基区电阻率，并获得较理想的杂质浓度

分布(如图 1 所示),有利于提高器件的击穿电压和改善电流特性的目的.

器件的击穿现象分为体内击穿和表面击穿,二者均与 p 区、n 区的浓度分布有关,这是因为掺杂浓度的高低关系到 p-n 结的空间电荷区随电压的展宽及电场强度的变化. 防止 p-n 结发生表面击穿的一个重要途径是降低 p-n 结的表面电场. 表面掺杂浓度的调整也有控制表面电场的作用,尤其在 p^+-n 负斜角造型情况下,表面空间电荷区主要处于高浓度 p^+ 层,则 p^+ 区掺杂浓度分布对电场的调整有很大的作用. 因此,镓铝双质掺杂能使 p 型扩散层的前沿浓度梯度减小,在同样的造型角度下,则表面电场有明显下降. 显然,在改善电场(负角造型)方面,镓铝双质掺杂优于单质(如 B 或 Ga)扩散,能明显地提高表面耐压能力.

器件的耐压能力与掺杂后 Si 的电阻率有关,即与杂质浓度分布有关. p-n 结能承受反向电压的大小与空间电荷区的展宽多少有关,空间电荷区在 n 区和 p 区的展宽 W_n, W_p 与 n 区、p 区的掺杂浓度 N_D, N_A 成反比[7],空间电荷区在浓度低的一侧(如 n 基区)展宽,决定基区的电阻率,而在浓度高的一侧展宽,则决定于该侧的杂质浓度分布. 镓铝掺杂与硼扩散相比,因前者的浓度低于后者,则前者在扩散区的电阻率高于后者,在一定条件下,p-n 结的击穿电压与掺杂区的电阻率成正比,在相同的最高电场强度下,前者的空间电荷区扩展较宽,能明显提高器件的耐压能力,故镓铝掺杂的器件其电压水平高于硼扩散器件. 镓铝掺杂与硼铝扩散相比,二者的铝分布大致相同,故两种掺杂工艺制备的器件其电压水平大致相当,实验表明,镓铝扩散管其电压等级合格率优于硼铝扩散管. 镓铝掺杂与开管扩镓相比,虽二者的浓度分布属高斯分布,但前者的浓度分布缓于后者,故镓铝扩散管的电压明显高于扩镓管.

3.2. 镓铝掺杂与触发特性

利用扩展电阻法(SRP)对开管镓铝掺杂样品和硼铝涂层扩散样品进行了测量,图 1 给出了这两种样品的杂质浓度分布曲线. 镓铝掺杂的浓度分布曲线(I)大致分为三段:a 段为 Ga 的平缓段,约为 20—25 μm,浓度为 10^{17}—10^{18} cm^{-3},浓度梯度小,b 段为 Ga 的扩散段,浓度梯度较大,c 段为 A1 的扩散段,浓度低,分布较缓. 硼铝扩散的浓度分布曲线(Ⅱ)也大致分为三段:曲线中的段①为硼的饱和段,浓度很高,约为 10^{19} cm^{-3},段②为硼的扩散段,分布较陡,浓度梯度大,段③基本同于(I)中的 c 段.

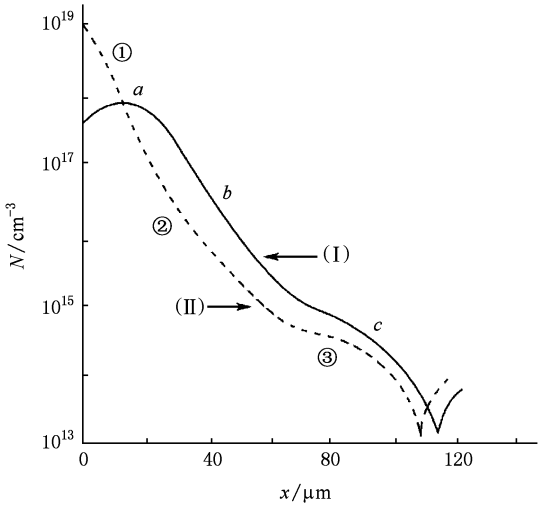


图 1 镓铝和硼铝扩散的杂质浓度分布曲线

设计的光刻版为一定时,门极触发电压 V_{GT} 和门极触发电流 I_{GT} 的大小主要取决于短基区平均电阻率 $\bar{\rho}$ 的大小,即决定于次表面浓度 N_{sic}. 因曲线(I)中的 Ga 浓度分布具有一平缓段,二扩结深 $x_{j.2}$(磷扩,18—20 μm)正好落在平缓处,故 N_{sic} 不因 $x_{j.2}$ 的小范围变化而改变. 因此,采用镓铝掺杂工艺制备的晶闸管,V_{GT}, I_{GT} 和 I_H(维持电流)具有高度一致性. 采用扩硼或硼铝扩散工艺,J_3 结(磷扩后形成的 p-n 结)附近硼的分布很陡,浓度梯度大,若 Si 片因抛光或 $x_{j.2}$ 略有变动(2—3 μm),就会引起门极控制特性的变化,即导致 V_{GT}, I_{GT}, I_H 很大的分散性. 通过分析对比,镓铝掺杂工艺的一个突出特点是触发参数有很高的一致性,是扩硼和硼铝扩散工艺无法比拟的. 图 2 和图 3 分别给出这两种扩散工艺的 V_{GT}, I_{GT} 一致性比较,从图中明显地看出镓铝掺杂制备的晶闸管其触发参数的一致性优于硼铝涂层扩散工艺.

3.3. 镓铝掺杂与通态压降

通态压降 V_{TM} 是晶闸管的一个重要参数,V_{TM} 是由结压降 V_j、体压降 $V_{体}$ 和接触压降三部分组成,在这里主要考虑 V_j 和 $V_{体}$. V_j 不仅与电流有关,还与 p-n 结两边的结构有关,p-n 结两边的浓度梯度越

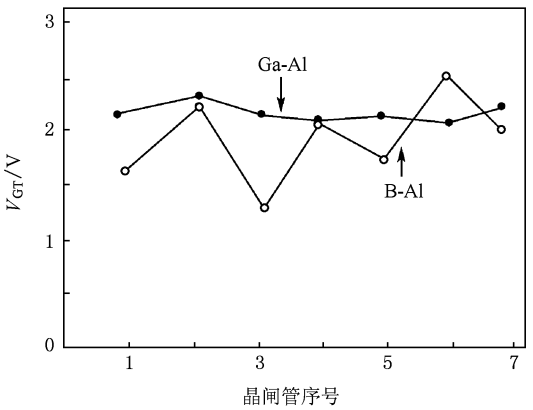


图 2　镓铝扩散与硼铝扩散的 V_{GT}一致性比较

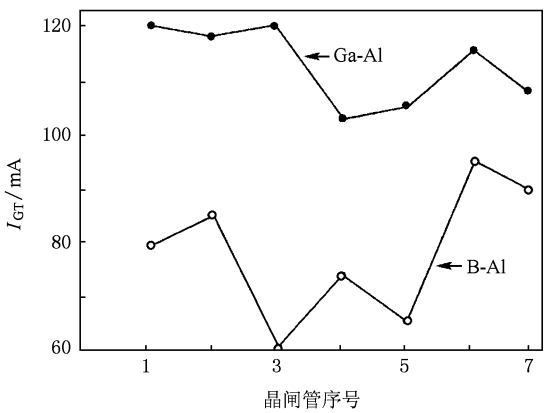


图 3　镓铝扩散与硼铝扩散的 I_{GT}一致性比较

大，势垒就越高，使扩散电位 V_D 增大，进而导致 V_j 增加. 反之，p-n 结两边的浓度降低，V_j 也随之减小. 因此，要减小 V_j，应采用先进的扩散工艺，以形成一个理想的缓变 p-n 结. 闭管扩 Ga 的杂质浓度服从余误差函数分布，浓度高，不仅 V_j 较大，而且 J_3 结的注入比低，进而影响少子寿命 τ_p；开管扩 Ga 的杂质浓度服从高斯分布，浓度较低，故 V_j 低于闭管扩 Ga；开管镓铝掺杂和硼铝扩散的杂质浓度大致服从高斯分布，尤其是扩 A1 段浓度低，这两种工艺制备的晶闸管其 V_j 较小.

$V_{体} \approx W^2/2\mu L$（W 为基区宽度、L 为扩散长度、μ 为迁移率），$V_{体}$ 与 W 的平方成正比，与 L 成反比，L 又与寿命 τ 的 1/2 次方成正比，$V_{体}$ 主要决定于基区宽度和少子寿命. 要减小 $V_{体}$，除了在保证反向耐压的前提下尽量减小基区宽度之外，应采取措施提高少子寿命 τ_p. 镓铝掺杂全过程是在同一台扩散炉中经一次高温连续完成，减少了升、降温过程；Ga 源对 Au，Cu 杂质具有吸附剂的作用[8]；掺杂过程有 SiO_2，H_2 和 N_2 的保护，减少了杂质的污染；高温过程结束后又采取缓慢降温法. 这些措施能明显减少扩散层中的晶格缺陷和复合中心，有利于提高少子寿命. 实验表明，不同的杂质源和扩散方法，造成 Si 片的原始寿命衰减程度是不一样的. 样品经特殊处理后用 SBT-5 型同步示波器测量少子寿命，表 3 列出三种不同工艺的 τ_p 值，镓铝掺杂工艺的 τ_p 值较高，一致性较好，从表 4 看出镓铝掺杂的 V_{TM} 低于硼铝扩散.

表 3　三种扩散工艺的 τ_p 测量值（单位 μs）

批　次	1	2	3	4	5	6
镓铝扩散	41	45	44	45	43	40
硼铝扩散	36	29	34	38	33	34
开管镓扩散	20	17	23	20	18	21

表 4　两种扩散工艺的 V_{TM} 测量值（单位 V）

批 次	1	2	3	4	5	6	平均值
镓铝扩散	1.88	1.93	1.92	1.91	1.85	1.90	1.90
硼铝扩散	1.97	2.07	1.96	1.92	2.02	1.95	1.98

3.4. 镓铝掺杂与浪涌能力

影响晶闸管浪涌能力的因素主要有电流密度、有效寿命和有效基区宽度等. 实验表明，在同一 Si 片上若掺杂不均匀或各区域的寿命不同，不仅造成体压降增大，而且还会导致电流密度的分布不均匀，则在同一电压下，电流密度相差很大，进而导致器件在过载大电流通过时将引起局部过热而损坏，必然造成浪涌特性恶化. 依据实验和理论分析，提高扩散均匀性，提高少子寿命及横向少子寿命的均匀性，是提高器件的电流密度和增强耐浪涌能力的重要途径之一. 因 Ga 的预沉积采用 SiO_2/Si 系统，Ga 的浓度分布在该系统具有连续性，气态 Ga 以极快的速度穿过 SiO_2 膜，且在 SiO_2-Si 界面均匀分布，高温下 Ga 向 Si 中均匀扩散，得到均匀的 p 型扩散层，并该工艺还具有上述优越性，不仅显著提高 τ_p，而且同一 Si 片上的 τ_p 均匀性好. 在大电流下，电流密度分布也是均匀的，不会发生局部区域的电流过于集中. 根据需要可选取最佳寿命，以保证通态 $J-V$ 曲线偏向 J 轴，等效切线电阻 R_e 较小，在浪涌电流 I_{TSM} 发生时，V_{TSM} 较小[9]，瞬时的发热很小，因而该工艺有利于提高器件的耐浪涌能力.

3.5. 镓铝掺杂与动态参数

电压临界上升率 dv/dt 和电流临界上升率 di/dt 是晶闸管的两个动态参数. 器件的使用过程发生过压损坏或过流损坏,主要原因是动态特性不理想. 为保证器件可靠地用于实际线路中,必须改善动态特性,才能保证有好的静态特性. 晶闸管承受 dv/dt 和 di/dt 的能力受多种因素的影响,受主掺杂是其中因素之一. 硼铝扩散在严格控制扩散参数下,虽也能满足动态特性的要求,但该工艺往往导致截面扩散浓度不均匀,一旦工艺条件和操作有微小波动,如磷扩 $x_{j.2}$ 推移到一扩低浓度区,即 N_{sic} 降低,短基区 $\overline{\rho}$ 的升高,易导致 dv/dt 耐量陡减[9]. 但镓铝扩散的浓度分布具有一平缓段,在某区域内 N_{sic} 基本不变,若 $x_{j.2}$ 有较小变化,$\overline{\rho}$ 基本维持不变. 又因该工艺有良好的扩散均匀性和重复性,扩散参数具有较好的可调性和可控性,容易做到提高 N_{sic},即降低 $\overline{\rho}$,使 dv/dt 和 di/dt 耐量同步提高. 采用镓铝掺杂工艺生产的 KP500 型和 KP600 型晶闸管,$dv/dt > 1000$ V/μs,$di/dt > 100$ A/μs,能满足设备仪器对器件的要求,但硼铝扩散工艺很难实现.

4. 结 论

实验和样品检测表明,晶闸管的耐压水平、触发特性、通态压降、浪涌能力和动态特性的改善或提高,均与镓铝双质掺杂有直接的关系. 镓铝掺杂技术是在 SiO_2/Si 系统分段掺杂,又在同炉经一次高温连续完成,防止了杂质沾污,能实现 Si 中的高均匀掺杂,且重复性好,可获得较理想的杂质浓度分布;Ga,Al 与 Si 的共价半径相接近,可减少晶格缺陷,提高少子寿命,降低压降,这些是镓铝掺杂技术提高晶闸管性能的主要原因. 实验对比和理论分析都表明,镓铝掺杂技术优于其他受主扩散工艺.

[1] Wang C L, Gao Y, Ma L, Zhang C L, Kim E D, Kim SC 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2296 (in Chinese) [王彩琳、高 勇、马丽、张昌利、金垠东、金相喆 2005 物理学报 **54** 2296]

[2] Liu X X, Sun Y 1995 *Chinese Journa*l *of Semiconductors* **16** 235 (in Chinese) [刘秀喜、孙 瑛 1995 半导体学报 **16** 235]

[3] Liu X X, Sun Y, Li Y G 2004 *Chinese Journa*l *of Semiconductors* **25** 110 (in Chinese) [刘秀喜、孙 瑛、李玉国 2004 半导体学报 **25** 112]

[4] Guo D Y, Waag Y B, Yu J, Gao J X, Li M Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5551 (in Chinese) [郭冬云、王耘波、丁 军、高俊雄、李美亚 2006 物理学报 **55** 5551]

[5] Lu X, Wu C G, Zhang W L, Li Y R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2513 (in Chinese) [卢 肖、吴传贵、张万里、李言荣 2006 物理学报 **55** 2513]

[6] Zhang Y K, Kong D J, Feng A X, Lu J Z, Ge T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6008 (in Chinese) [张永康、孔德军、冯爱新、鲁金忠、葛 涛 2006 物理学报 **55** 6008]

[7] Xu C X 1987 *Endurance and surface Insulated Technology of High Voltage silicon Semiconductor Device*. (Beijing: Mechanical Industry Prese) 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] Momma N, Taniguchi H, Ura M, Ogwa T 1978 *J. Electrochem. Soc.* **125** 963

[9] Pei S H, Zhao F X, Liu XX 1988 *Dianli Dianzi Jishu* **3** 45 (in Chinese) [裴素华、赵富贤、刘秀喜 1988 电力电子技术 **3** 45]

Studies on the mechanisms of enhancing the performances of thyristors by Ga-Al doping*

Wang Gong-Tang†　　Liu Xiu-Xi

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

(Received 6 May 2009; revised manuscript received 20 October 2009)

Abstract

In accordance with the character of diffusing Ga and Al in SiO_2/Si system and in the use of magnetic-control device for controlling accurately the doping quantity of Ga, the double-impurity doping of both Ga and Al is completed consecutively in the same high-temperature diffusion furnace. It is shown that the doping is with good uniformity, repeatability and continuity. A uniform distribution of impurity concentration can be achieved. Since the covalent radiuses of the atoms, Ga and Al, are close to that of Si, and the temperature is slowly dropped after the high temperature, the defects of the lattice is obviously reduced. The lifetime of minority carrier is significantly increases and the voltage drop is reduced. In this paper, the mechanism of enhancing the performances of thyristors by Ga-A1 doping is investigated. Our result shows that the double-impurity doping technique is conducive to raising the level of breakdown voltage and surge capacity, and improving the characteristics of current, triggering and dynamics significantly. The double-impurity doping technique is better than other known techniques of doping.

Keywords: Ga-Al double-impurity doping, mechanism, thyristor, quality

PACC: 6170T

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. Y2003A01).

† E-mail: wanggt@ sdnu. edu. cn