

低能量 Ar^+ 背面轰击对 晶体管特性的影响

李观启 曾绍鸿 黄美浅

(华南理工大学应用物理系 广州 510641)

摘要 在完成硅平面晶体管管芯和上部电极制备后,用低能量氩离子束进行背面轰击,能显著增大高频和超高频小功率晶体管的电流放大系数,提高特征频率、功率增益和输入阻抗,减小噪声系数和使击穿特性变硬,而势垒电容和薄层电阻不改变.实验结果和理论分析表明,上述参数的改善与轰击后界面态密度的减小、少数载流子寿命和扩散系数的增大有关.

PACC: 7850, 8160, 7300

1 引言

业已证明,高能量 Ar^+ 注入技术和低能量 Ar^+ 刻蚀工艺形成的晶格损伤层在热退火中能有效地吸除硅中的重金属离子^[1~6],因而在微电子器件和集成电路的制造中受到重视.为此,对硅中吸除技术的物理机制进行了深入的探讨^[7~10].以前的研究表明,利用 Ar^+ 穿透二氧化硅层向硅中注入具有良好的吸除效果,而且其效果与注入能量、注入剂量及退火温度有关^[2,11].

在早期的研究中,离子注入是在管芯制作之前进行的. M. R. Poponiak 等人发现,对双极型晶体管,在发射区预扩散后注入离子的吸除效果要比基区预扩散后注入的效果好^[4]. K. D. Beyer 等人考虑到具有吸除作用的晶格损伤层将在氧化过程中被部分消除,因而在生长 MOS 电容器氧化层之后才进行注入^[2]. 齐建华等人则在已制作 pn 结阵列的硅片背面注入 Ar^+ , 并取得了显著减小漏电流和改善击穿特性的结果^[12]. 然而,以前的研究一般是在高能量(60~160keV)下注入 Ar^+ 和在较高温度(800~1100 °C)下进行长时间(几小时)退火的. 显然,在管芯制作前的注入不能吸除氧化、扩散和蒸发工艺中引入的缺陷和金属杂质,而在管芯制作之后进行高温长时间退火又会使掺杂区的浓度和结深发生变化,

李观启 男, 1940 年生, 副教授, 从事微电子学方面的教学和研究
曾绍鸿 男, 1940 年生, 实验师, 从事微电子学方面的教学和研究
黄美浅 男, 1944 年生, 副教授, 从事微电子学方面的教学和研究
1995 年 1 月 17 日收到初稿, 1995 年 6 月 20 日收到修改稿

并且会损坏已制作的铝电极. 虽然离子刻蚀所形成的表面损伤层也具有吸除作用^[3,13~16], 但却引入了表面正电荷层, 并使 SiO₂-Si 系统的界面态增加. 我们认为, 在管芯制作之前采用高能量离子注入和高温长时间退火以吸除硅片的原始金属杂质, 而在管芯制作后又采用背面低能量离子轰击和低温退火, 会取得更佳的效果.

本研究是在完成高频和超高频小功率晶体管管芯制作之后, 在国产 LD-1 型离子束镀膜机中, 用低能量(550eV)Ar⁺ 束直接轰击样品的背面(衬底为室温), 并在 450 °C 下用 N₂ 气氛保护退火 20 分钟. 文中研究了低能量 Ar⁺ 轰击背面对双极型晶体管交、直流电流放大系数、击穿特性、特征频率、功率增益、噪声系数及输入阻抗的影响. 为了弄清上述电参数变化的原因, 我们对硅-二氧化硅系统的界面态密度、少数载流子寿命、pn 结的势垒电容和扩散层的薄层电阻进行了测量.

2 实验

采用晶面为(111)、电阻率为 0.5~0.8Ω·cm 的 n/n⁺ 硅外延片和常规平面工艺制造超高频小功率晶体管 3DG73 和超高频小功率晶体管 3DG6. 将已制作铝电极的管芯放入国产 LD-1 型离子束镀膜机中, 用 Ar⁺ 轰击样品的背面. 轰击时衬底为室温, 真空度为 3.2×10⁻³ Pa, 离子束能量为 550eV, 束流密度为 0.3mA·cm⁻² 和 0.5mA·cm⁻², 轰击时间为 15~60 分钟. 然后在 450 °C 下用氮气保护退火 20 分钟. 管芯封装后测量其直流参数、交流参数和极限参数.

利用上述 n/n⁺ 硅外延片生长厚度约 50nm 的氧化层, 并制成 MOS 电容器. 背面经轰击后, 在 450 °C 下用氮气保护退火 20 分钟. 采用准静态 C-V 法测量硅-二氧化硅系统的界面态密度.

在电阻率为 8~12Ω·cm 的 p 型(111)硅单晶片上生长厚度约为 800nm 的氧化层, 然后光刻窗口进行磷扩散形成 n⁺p 结. 样品背面经轰击后, 用四探针法测量薄层电阻, 用高频 C-V 法测量 pn 结势垒电容随反向偏压的变化, 用开路电压衰减法测量少数载流子的复合寿命.

3 实验结果与分析

两种晶体管管芯每批均测试 20 个样管, 共测量五批. 结果表明, 经轰击后样管的击穿电压基本不变, 但击穿特性普遍变硬; 其直、交流电流放大系数、特征频率、功率增益和输入阻抗显著提高, 噪声系数明显降低; 样品经保存三年后参数稳定. 表 1 和表 2 分别给出两种晶体管管芯轰击前后有关参数的变化; 轰击条件为: 550eV、0.5mA·cm⁻² 和 40 分钟. 结果还表明, 束流密度为 0.5mA·cm⁻² 时的效果比 0.3mA·cm⁻² 时好, 轰击时间为 40 分钟时的效果比 15 分钟时稍好, 但在 40~60 分钟范围内几乎无变化.

测量结果还表明, 轰击对扩散层的薄层电阻和 pn 结的势垒电容没有影响.

表 1 3DG73 管芯轰击前后的参数变化

参数符号	测试条件		参数值		平均变化率
			轰击前	轰击后	
h_{FE}	$V_{CE}=6V$ $I_C=2mA$		29.4~91	74~181	+72%
h_{21}			38~81	67~130	+60%
$h_{11}(k\Omega)$			0.76~1.20	0.90~2.20	+32%
$f_T(MHz)$	$f=400MHz$ $V_{CE}=6V$ $I_C=2mA$		1250~1350	1500~1720	+20%
$K_p(dB)$			26~34	30~35	+9.5%
$N_F(dB)$	$V_{CE}=6V$ $I_C=2mA$	$f=400MHz$	3.50~4.48	3.10~3.50	-7.9%
		$f=1kHz$	12~18	7~16.8	-48.3%

表 2 3DG6 管芯轰击前后的参数变化

参数符号	测试条件		参数值		平均变化率
			轰击前	轰击后	
h_{FE}	$V_{CE}=10V$ $I_C=3mA$		100~115	160~166	+52.2%
h_{21}			76~85	115~120	+44.2%
$h_{11}(k\Omega)$			1.0~1.9	1.9~2.1	+76.1%
$f_T(MHz)$	$V_{CE}=10V$ $I_C=3mA$	$f=30MHz$	200~280	230~322	+14%
$K_p(dB)$		$f=100MHz$	7~8.4	8~9.4	+12%
$N_F(dB)$			10~10.5	9.1~9.3	-11.9%
			$f=1kHz$	1~2.5	1~2

图 1 给出了硅-二氧化硅系统界面态密度随轰击时间和束流密度的变化. 由图可见, 界面态密度随轰击时间的增加而减少, 最后又缓慢地增大. 图 2 给出了少数载流子复合寿命

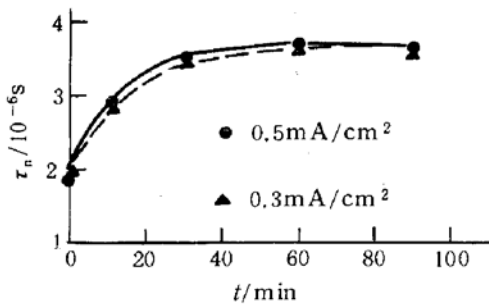


图 1 界面态密度随轰击时间的变化

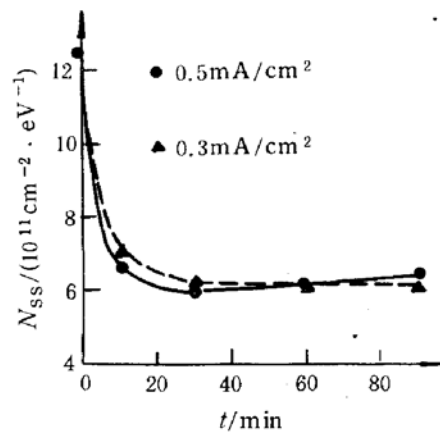


图 2 少数载流子复合寿命随轰击时间的变化

随轰击时间和束流密度的变化. 显然, 少数载流子寿命随轰击时间的增加而增加, 最后又趋于减小. 由图 1 和图 2 还可看到, 束流密度为 0.5 mA/cm² 时的效果比 0.3 mA/cm² 时好. 此外, 俄歇电子能谱分析表明, 轰击后硅体内未检测到 Ar⁺ 的存在.

4 讨论与结论

npn 型缓变基区晶体管的共发射极电流放大系数可表示为:

$$\beta^{-1} = \frac{R_{se}}{R_{sb}} + \frac{W_b^2}{\lambda D_{nb} \tau_{nb}} + \frac{S A_s W_b N_b}{A_e D_{nb} N_b(0)} + \frac{I_{re}}{I_e} \quad (1)$$

式中 R_{se} 和 R_{sb} 分别为发射区和基区的薄层电阻; W_b 为基区宽度; λ 是与基区自建电场有关的因子; τ_{nb} 和 D_{nb} 分别为基区少数载流子的寿命和扩散系数; A_e 为发射区面积; S 和 A_s 分别为基区表面复合速度和表面复合的有效面积; N_b 和 $N_b(0)$ 分别为基区平均杂质浓度和发射结势垒区与基区交界处的基区杂质浓度; I_e 为发射极电流, I_{re} 为发射结势垒区及其表面的复合电流. 由于轰击后薄层电阻和势垒电容不变化, 掺杂总量、杂质浓度分布和结深保持恒定, 即 R_{se} 、 R_{sb} 、 W_b 和 λ 不改变, 因此, h_{FE} 和 h_{21} 的增大是复合中心密度(包括界面态密度)减少、 τ_{nb} 和 D_{nb} 增大的结果.

晶体管特征频率 f_T 和共发射极输入阻抗 h_{11} 可分别表示为:

$$f_T^{-1} = 2\pi[r_e(C_{Te} + C_{Tc}) + \frac{W_b^2}{\lambda D_{nb}} + \frac{X_{mc}}{2V_s} + r_{cs}C_{Tc}] \quad (2)$$

$$h_{11}^{-1} = (1 - \alpha_0)g_e + j\omega(C_{Te} + C_{Tc} + g_e \frac{W_b^2}{\lambda D_{nb}}) \quad (3)$$

式中 $r_e = kT/qI_e$; 为发射结动态电阻; C_{Te} 、 C_{Tc} 分别为发射结和集电结的势垒电容; X_{mc} 为集电结势垒区宽度; V_s 为载流子的散射极限速度; r_{cs} 为集电极串联电阻; α_0 为共基极直流电流放大系数. 我们的实验证明, 轰击对势垒电容和薄层电阻没有影响, 即 C_{Te} 、 C_{Tc} 、 X_{mc} 、 W_b 和 λ 不会改变. 由式(2)和(3)还可看到, f_T 和 h_{11} 均与基区少数载流子的扩散系数 D_{nb} 有关, 而轰击后 f_T 和 h_{11} 同时提高, 显然可归因于 D_{nb} 的增大. 此外, h_{11} 的提高尚与 α_0 的增大有关. 轰击后功率增益 K_p 增大与特征频率 f_T 的提高有关. 背面轰击对 N_{ss} 、 τ_{nb} 和 D_{nb} 的影响可作如下解释: 轰击产生的晶格损伤层与体内相比, 对金属原子有较高的固溶度^[8,9], 因而在退火中使有源区的金属原子向损伤层凝聚. 另外, 晶格损伤层会引入应力, 该应力对氧化、扩散和铝蒸发工艺产生的应力起补偿作用, 使缺陷密度减少. 金属原子和缺陷的减少, 会使体内复合中心和非本征界面态(表面复合中心)减少, 以及减弱缺陷的散射作用, 因而 τ_{nb} 和 D_{nb} 增大. 然而, 过长时间的轰击将出现应力过补偿, 产生新的缺陷, 使 N_{ss} 、 τ_{nb} 和 D_{nb} 的改善程度减少甚至出现相反的变化.

一般认为, 低频噪声主要由 $1/f$ 噪声贡献, 其电流均方值可表示为:

$$i_i^{-1} = K I_b^\alpha f^{-\gamma} \Delta f \quad (4)$$

式中 I_b 为基极电流; Δf 为测试系统的带宽, α 和 γ 为接近于 1 的常数, K 值与表面能级、位错及层错等有关. 我们知道, 表面能级不仅与硅表面悬挂键贡献的本征界面态有关, 而且, 由于硅-二氧化硅界面处热胀系数的较大差异而产生热应力, 在界面附近产生大量的缺陷, 这些缺陷与杂质沾污形成的非本征界面态也在禁带中形成表面能级. 轰击后低频噪声

的明显减小,是由于界面态密度降低,使 K 值减小的结果. 在忽略 $1/f$ 噪声的情况下,由热噪声和散粒噪声决定的噪声系数可表示为:

$$N_F = 1 + \frac{r_b}{R_g} + \frac{r_e}{2R_g} + \frac{(R_g + r_e + r_b)}{2r_e R_g} \left[\left(\frac{f}{f_a} \right)^2 + \frac{1}{h_{FE}} \right] \quad (5)$$

$$f_a = (1 + m)f_T \quad (6)$$

式中 R_g 为信号源内阻; r_b 为基极电阻, r_e 为发射结动态电阻; h_{FE} 为共发射极直流电流放大系数; f 为测试频率; f_T 为特征频率; m 为超相移因子. 由式(5)和式(6)可见,对于给定的晶体管和测试信号源, r_e 、 r_b 和 R_g 为常数;显然,轰击后高频噪声系数的减小与 h_{FE} 和 f_T 的增高有关.

本文的结论是:在形成硅平面小功率晶体管管芯和上部铝电极制作之后,用低能氩离子束直接轰击管芯背面,能有效地增大晶体管的电流放大系数(连同小电流下的值),提高特征频率、功率增益和输入阻抗,降低噪声系数,并使击穿特性变硬;上述效果与轰击时间和束流密度有关. 实验结果和理论分析表明,上述特性的改善与轰击后界面态密度的减小、器件有源区缺陷密度的减小及基区少数载流子寿命的增大有关.

参 考 文 献

- [1] T. M. Buck, K. A. Pickar, J. M. Poate *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1972, **21**: 485.
- [2] K. D. Beyer and T. H. Yeh, J. Electrochem. Soc., 1982, **129**: 2527.
- [3] W. D. Sawyer, J. Weber, G. Nabert *et al.*, J. Appl. Phys., 1990, **68**: 6179.
- [4] M. R. Poponiak, T. Nagasaki and T. H. Yeh, J. Electrochem. Soc., 1977, **124**: 1802.
- [5] K. Murase and H. Harada, J. Appl. Phys., 1977, **48**: 4404.
- [6] B. H. Yun, Appl. Phys. Lett., 1981, **39**: 330.
- [7] G. B. Bronner and J. D. Plummer, J. Appl. Phys., 1987, **61**: 5286.
- [8] J. S. Kang and D. K. Schroder, J. Appl. Phys., 1989, **65**: 2974.
- [9] 陈畅生, 半导体学报, 1992, **13**: 174.
- [10] 潘姬, 齐建华, 赵鸿麟, 等, 半导体学报, 1985, **6**: 321.
- [11] 齐建华, 李树荣, 半导体技术, 1988, **1**: 32.
- [12] 蒋荣华, 梁李成, 肖顺珍, 半导体光电, 1990, **11**: 289.
- [13] T. E. Seidel, R. L. Meek and A. G. Gullis, J. Appl. Phys., 1975, **46**: 600.
- [14] S. W. Pang, D. D. Rathman *et al.*, J. Appl. Phys., 1983, **54**: 3272.
- [15] R. Singh, S. J. Fonash, S. Ashok *et al.*, J. Vac. Sci. Technol, 1983, **A1**: 334.
- [16] S. J. Fonash, S. Ashok and R. Singh, Appl. Phys. Lett., 1981, **39**: 423.

Effect of Low Energy Ar⁺ Backsurface Bombardment on Bipolar Junction Transistor Characteristics

Li Guanqi, Zeng Shaohong and Huang Meiqian

(Department of Applied Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Received 17 January 1995, revised manuscript received 20 June 1995

Abstract The low energy argon ion beam has been used to bombard directly the backside of bipolar junction transistors at room temperature, and the characteristics of the transistors can be effectively improved. After the bombardment of transistor, the current gain, characteristic frequency, power gain and input impedance increase obviously, the noise factor decreases; and the electrical breakdown characteristics are improved. The effects are relevant to the bombardment time and beam current density. The results and analysis show that the improvement of transistor characteristics is relevant to the decreasing of interface state density at Si-SiO₂ interface, and the increasing of minority carrier lifetime and diffusion constant.

PACC: 7850, 8160, 7300