材料、结构及工艺

DOI:10.16818/j.issn1001－5868.20240109001

多晶硅/硅界面处理工艺对硅光敏晶体管性能影响的比较研究

黄绍春*,黄烈云,彭金萍,郭　培,向勇军
(重庆光电技术研究所,重庆 400060)

摘　要: 研究了多晶硅/硅发射极结构光敏晶体管的制备工艺。为分析多晶硅/硅界面质量对芯片性能的影响,通过对比低压化学气相淀积(LPCVD)多晶硅前不同表面预处理方案(RCA清洗和稀释氢氟酸漂洗)以及多晶硅淀积后不同温度退火工艺,系统研究了光敏晶体管直流增益(h_{FE})和发射极接触电阻(r_e)的变化情况。实验结果表明,采用稀释氢氟酸漂洗工艺可有效降低增益对偏置电压的敏感性;适当提高退火温度(900～1100 ℃)能够使发射极接触电阻率降低,同时显著改善芯片关键性能参数的一致性,但会导致峰值电流增益降低。该研究为优化光敏晶体管界面工程提供了重要工艺参考。

关键词: 硅光敏晶体管;多晶硅/硅界面;RCA清洗;电流增益;发射极接触电阻
中图分类号: TN386.2　**文章编号:** 1001－5868(2025)01－0070－05

Effects of Polysilicon/Silicon Interface Processing on Phototransistor Performance

HUANG Shaochun, HUANG Lieyun, PENG Jinping, GUO Pei, XIANG Yongjun
(**Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: We fabricated a silicon phototransistor having a polysilicon/silicon emitter structure. To evaluate the effect of the polysilicon/silicon interface on the performance of the phototransistor, we systematically studied the variations in DC current gain (h_{FE}) and emitter contact resistance (r_e) by comparing different surface pretreatment methods (routine RCA cleaning or RCA cleaning + HF dip) before the low-pressure chemical vapor deposition of polysilicon and subsequent thermal annealing at different temperatures after polysilicon preparation. Experimental results demonstrated that the additional HF dip caused the current-gain curve of the phototransistor to descend, whereas a high annealing temperature (900～1100 ℃) reduced the emitter resistance and allowed the characteristic parameters to be controlled well with minimal effects on the gain peak. This study provides valuable process references for optimizing interface engineering in phototransistors.

Key words: phototransistors; polysilicon/silicon interface; RCA clean; current gain; emitter contact resistance

0　引言

光敏晶体管是一类结合光电二极管光电转换能力和晶体管电流放大功能的光敏器件。与同样具有内增益的雪崩光电二极管(APD)相比,光敏晶体管具有工作电压低、噪声小等优点。更重要的是,光敏晶体管的直流增益h_{FE}可达数百到上千倍,并且可直接输出毫安级电流信号,这极大简化了应

收稿日期:2024－01－09.
*通信作者:黄绍春

用电路，因此，光敏晶体管已广泛应用于光电耦合器、光电编码器等模块中。

高直流增益h_{FE}是光敏晶体管芯片设计的难点。理论上，压缩晶体管基区宽度和增加重掺发射区的浓度都能提高h_{FE}值，目前常见h_{FE}=800～1 500的光敏晶体管，基区宽度和发射结深均仅为0.2～0.3 μm，发射结深已经接近少子空穴在重掺发射区的扩散长度（约为0.1 μm），即发射区对基区注入空穴是透明的，空穴在发射区将呈线性分布。按晶体管理论：基极体复合电流I_{VB}、发射结反注入空穴电流I_{pE}和集电结反向饱合电流I_{CBO}三者共同构成基极电流I_B，具有$I_B=I_{pE}+I_{VB}-I_{CBO}$的关系，其中$I_{pE}$与发射区空穴分布梯度成正比，减小发射结深、发射区重掺杂将使得I_B增大，h_{FE}值降低，对光敏晶体管h_{FE}的提升效果有限。

另一种方法是采用多晶硅发射极结构，其有三方面优势：（1）多晶硅重掺效应阈值比单晶硅高，可以获得更高的发射极注入效率[1]；（2）空穴在多晶硅中的迁移率比单晶硅低[2]，降低了I_B，对h_{FE}的贡献约为3倍；（3）根据隧穿理论，多晶-单晶界面薄氧层势垒、杂质在界面凝析形成的“低-高-低”势垒薄层都将阻挡反向注入的少子空穴，使I_B降低，对h_{FE}的贡献可达10倍以上[3]。

国内外已有研究团队报道了多晶硅发射极光敏晶体管的相关研究。匈牙利布达佩斯理工大学和MEV公司联合研究了多晶硅发射极光敏晶体管，实现高达1×10^4的电流增益，灵敏度远高于常规光敏管，短波响应也得到显著改善[4]。北京师范大学低能核物理研究所研制出一种全离子注入平面型多晶硅发射极硅光敏晶体管，其能实现高达3083倍的光增益[5]。

1　多晶硅发射极光敏晶体管

本文基于NPN结构深入研究了多晶硅发射极光敏晶体管的设计和工艺技术。设计选择厚度为20 μm，电阻率为20 Ω·cm的N型＜100＞晶向硅外延片制作光敏晶体管芯片，其发射极由多晶硅和单晶硅两部分构成。基于于志平等[6]提出的模型：随着多晶硅晶粒间晶界数增加，界面处载流子有效复合速度（S_p）降低，因此设计多晶硅厚度稍大于少子扩散长度，取0.4 μm，掺杂水平为10^{20} cm^{-3}；单晶硅发射结深约为0.1 μm，掺杂水平为10^{19} cm^{-3}；基区宽度为0.25 μm，掺杂水平为10^{16} cm^{-3}，器件结构如图1所示。

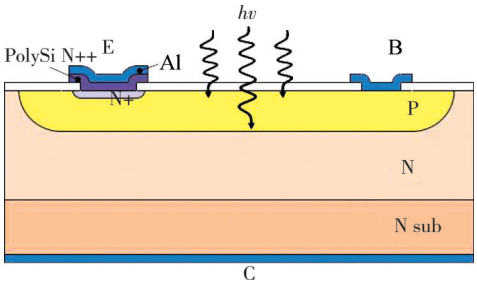


图1　多晶硅发射极光敏晶体管结构

当光敏晶体管工作时，入射光子在基区-集电区PN结空间电荷区内被吸收。在外加电场作用下，光生空穴注入左侧NPN管基区，空穴的积累使基区电位升高，使得发射结正偏，而集电结保持反偏，NPN管进入放大区，光电流就被放大了h_{FE}倍。多晶硅/硅发射极结构避免了单晶硅重掺带来的带隙窄变效应，能获得更高h_{FE}增益，还降低了工艺难度。单晶硅发射区由重掺多晶硅杂质扩散形成，避免了直接离子注入对单晶硅造成晶格损伤；在金属铝（Al）和单晶硅间插入多晶硅，完全消除了因直接接触形成铝尖峰引起失效的故障模式。

多晶硅/硅界面质量是多晶硅发射极工艺的关键。多晶硅界面薄氧层形成的势垒阻挡空穴，提高h_{FE}的同时也会阻挡电子输运，使得发射极接触电阻r_e增大。为降低多晶硅光敏晶体管的r_e值，改善器件综合性能，本研究探讨了不同多晶硅淀积前的表面处理方式和淀积后的退火处理工艺。

2　实验过程

多晶硅淀积前设计了两种表面处理方式：第一组按传统RCA方法清洗，先用NH_4OH, H_2O_2, H_2O配比为1:1:5溶液冲洗10 min，再用HCl, H_2O_2, H_2O配比为1:1:6溶液冲洗10 min；另一组清洗后，加漂1%的稀释氢氟酸HF（DHF）以去除硅表面的自然氧化层。两种方法处理过的硅片均立即送入低压化学气相沉积（LPCVD）炉中，在620 ℃下淀积400 nm厚的多晶硅。

多晶硅淀积后设计5个不同的退火温度：900，950，1 000，1 050和1 100 ℃，在氮气气氛中退火处理10 min。

随后将As离子注入多晶硅，其注入能量为70 keV，剂量为5×10^{15} cm^{-2}，并在900 ℃湿氧气氛

中推结30 min,形成单晶硅发射区。然后,依次淀积减反射/钝化膜,刻出接触孔,制作正面金属电极,最后蒸发背面金属,完成光敏晶体管芯片的制作。

接下来,将通过测试不同工艺方案得到光敏晶体管芯片的光电特性,研究表面预处理和多晶硅淀积后退火条件的影响。

3 结果与讨论

用光学膜厚仪测量硅不同预处理方式的表面自然氧化层厚度,为保证测量精度,采取单点多次测量拟合得到中心值的方法。实测RCA清洗后表面氧化层厚度为1.3~1.6 nm,RCA清洗与漂DHF方式处理后为0.3~0.8 nm,上述氧化层厚与文献[7-8]报道结果基本一致。

两种界面预处理方式得到光敏晶体管的集电极电流I_C和基极电流I_B与发射极-基极电压V_{BE}的特性曲线(Gummel图)如图2所示,两种条件下的I_C基本重合,但I_B差异明显,加漂DHF芯片的I_B电流在中、低注入区都小于RCA清洗芯片。图中同时绘出增益h_{FE}随V_{BE}变化情况,可见当中等注入时,加漂DHF芯片的h_{FE}约750倍,整体曲线较平缓;仅RCA清洗芯片的h_{FE}峰值可达2 200倍,但对V_{BE}变化很敏感。上述h_{FE}差异可用多晶硅发射极隧穿理论解释,多晶-单晶界面薄氧层势垒部分阻挡了反向注入空穴,降低I_B,导致h_{FE}增加,因此界面氧化层更厚的RCA清洗工艺可以获得更高的峰值增益,但整个增益曲线将更加陡峭。

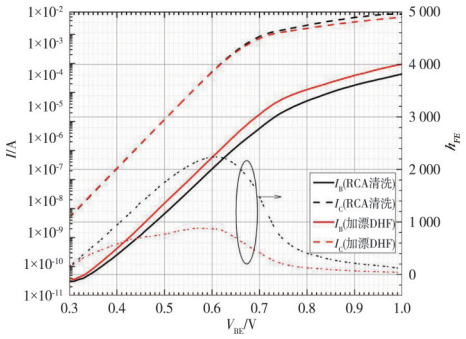


图2 两种界面预处理方式得到光敏晶体管I_C和I_B与V_{BE}的Gummel图

采用RCA法清洗圆片,淀积多晶硅后不同退火条件得到芯片的Gummel曲线见图3所示。退火温度变化基本不影响I_C,但会显著改变I_B:以950 ℃退火芯片的I_B作基准,低温组(900 ℃)的I_B要小5倍;高温退火将使I_B增大,1 050 ℃退火增大约3倍,1 100 ℃退火增大约4.5倍,反映为h_{FE}值的变化:退火温度从900 ℃增大到1 100 ℃,芯片峰值增益从2 200倍降低到480倍。

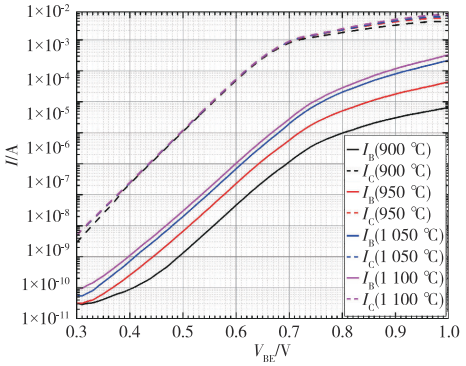


图3 多晶硅淀积前采用RCA法清洗,淀积后不同退火温度处理的光敏晶体管的Gummel图

多晶硅后退火温度高低对加漂DHF界面预处理芯片Gummel曲线的影响(如图4所示)和对RCA预处理芯片的影响一致:不改变I_C,提高退火温度将使I_B增加。以900 ℃退火芯片为参照,950 ℃退火使I_B增大约2倍,1 000 ℃退火增大约3倍,此后退火温度升高(1 050 ℃)将不再能推高I_B。增益值h_{FE}方面,退火温度从900 ℃提高到1 050 ℃,芯片增益从1 300倍降低到400倍。

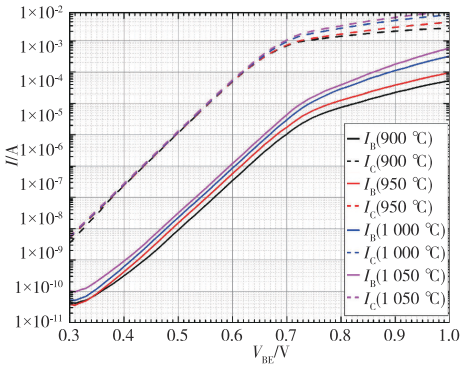


图4 多晶硅淀积前加漂DHF预处理,淀积后不同退火温度处理的光敏晶体管的Gummel图

多晶硅淀积后不同退火温度对接触电阻也有影响。根据经典Ning-Tang方法[9],提取发射极接触电阻r_e和基极接触电阻r_{bx},退火温度的影响如图5所示,随退火温度升高,经RCA清洗和加漂DHF预处理芯片的r_e和r_{bx}都逐步降低,特别是经RCA清洗的芯片,在950 ℃以上的高温退火后,r_{bx}快速降低。值得注意的是图5中退火温度对r_e的影响相对

较小，经过分析认为这与光敏晶体管发射极接触面较大（76 μm×76 μm）有关。

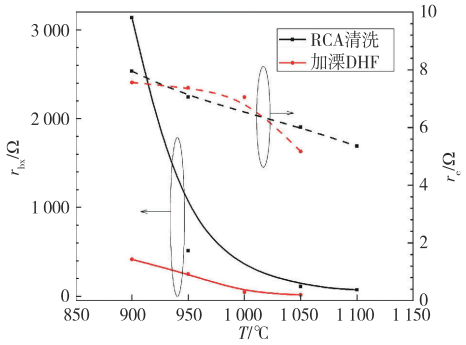


图 5　多晶硅发射极光敏晶体管接触电阻随退火温度变化的情况

高温退火改变光敏晶体管接触电阻的机理也与多晶硅/硅界面薄氧层有关。薄氧层形成了阻挡基区反向注入空穴的势垒，RCA 清洗预处理的界面薄氧层相对更厚，能阻挡更多的空穴。薄氧层微观上呈现多孔结构[10]，其内部有一系列穿透薄氧层的微细小孔，多数载流子只能从微孔穿过，这一过程贡献了大部分的发射极和基极接触电阻。高温退火使界面薄氧层中微细小孔密度增加，更多的空穴反向注入形成了更大的 I_B。RCA 预处理芯片经 1 050 ℃退火，RCA 与 DHF 预处理芯片经 1 000 ℃退火后，界面薄氧层中微细孔密度趋于饱和，多晶硅/硅之间接近理想接触。此后，继续提高退火温度将不能再增大 I_B，这可能是界面薄氧层已不再变化，或者是薄氧层变化与基区展宽等效应的影响相互抵消所致。

测试流片得到的硅光敏晶体管的光电响应特性，除增益值 h_{FE} 差异外，未发现其他明显不同。如图 6 所示是经 RCA 与 DHF 预处理，多晶硅后 1 000 ℃退火的芯片对不同光辐照度的光电响应曲，测试光源峰值波长为 850 nm。

考虑工艺的可重复性，选择 RCA 预处理与多晶硅后 1 050 ℃退火，DHF 预处理与多晶硅后 1 000 ℃退火两种工艺方案的芯片进行统计，分析发射极接触电阻 r_e 和增益 h_{FE} 的分布情况，如图 7 所示。

从图 7 可以看出，RCA 预处理芯片可获得相对较高的 h_{FE}，但伴随着比加漂 DHF 预处理芯片高的 r_e；同时，RCA 预处理芯片 h_{FE} 和 r_e 值的离散性都较大。从工艺的可制造性角度分析，多晶硅淀积前仅做 RCA 清洗，由于界面氧化层相对较厚，将增加部分关键参数的离散性。尽可能地减小多晶硅/硅界面氧化层，对于降低光敏晶体管接触电阻、提高工艺可重复性具有重要意义。

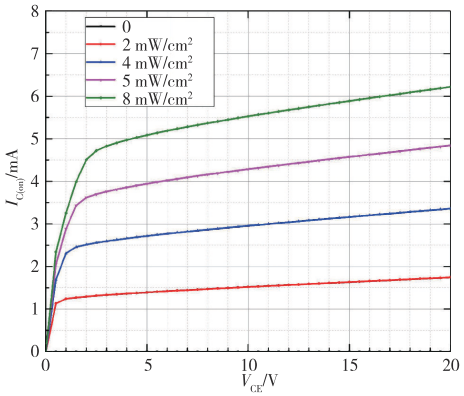
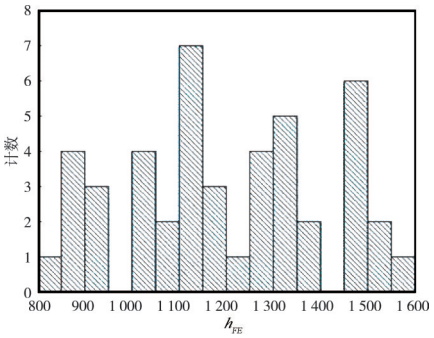
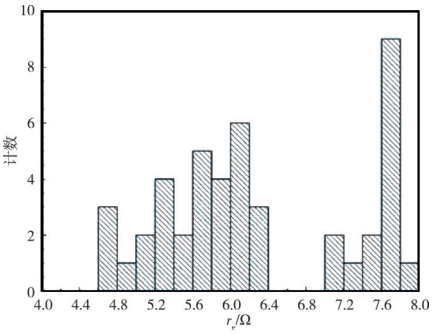


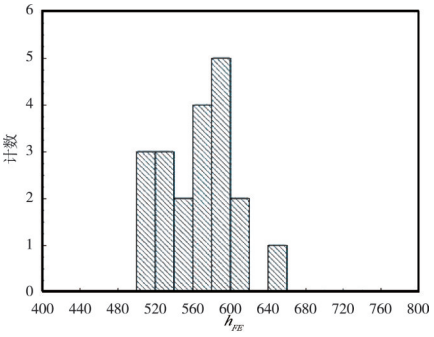
图 6　多晶硅发射极光敏晶体管芯片在不同光辐照度下的光响应曲线



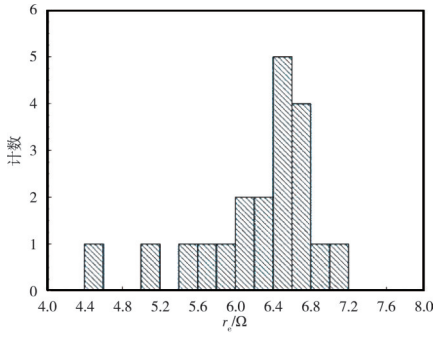
（a）RCA＋1 050 ℃



（b）RCA＋1 050 ℃



（c）DHF＋1 000 ℃



(c)DHF+1 000 ℃

图7 不同多晶硅/硅界面处理后光敏晶体管增益和发射极接触电阻的分布情况

4 结论

研究了多晶硅/硅发射极结构光敏晶体管的制作工艺,为分析多晶硅/硅界面质量对芯片性能的影响,比较了常规RCA清洗和加漂DHF两种预处理方式的界面薄氧层厚度和Gummel曲线,研究结果表明RCA清洗加漂DHF能减少界面氧化层,使硅光敏晶体管电流增益峰值降低,但增益曲线更平缓。进一步对比了多晶硅淀积后不同退火温度对两种界面预处理方案芯片性能的影响,发现随着退火温度升高,两种芯片的增益都不断降低,并最终趋于稳定。统计分析了不同界面预处理和多晶硅淀积后退火条件组合的工艺方案对芯片电流增益h_{FE}和发射极接触电阻r_e值的影响,结果表明:从提高芯片性能参数一致性角度考虑,为改善多晶硅发射极光敏晶体管的综合性能,应尽可能减小多晶硅/硅界面氧化层厚度,降低接触电阻、平缓增益曲线。

参考文献:

[1] Graul J, Glasl A, Murrmann H. High-performance transisotrs with arsenic-implanted polySi emitters[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1976, 11(4): 491-495.

[2] Mandurah M. A model for conduction in polycrystalline silicon-Part I: Theory[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1981, 28(10): 1163-1171.

[3] Ashburn P. Polysilicon emitter technology[C]// Proceedings of the Bipolar Circuits and Technology Meeting, 1989: 90-97.

[4] Nam N S, Zolomy I, Abdulhadi A H. Extremely high-sensitivity bulk-barrier phototransistor applying a polycrystalline emitter[J]. Sensors and Actuators A, 1994, 41(1/3): 88-92.

[5] 王晓慧, 李国辉, 阎凤章. 新结构多晶硅发射极光电晶体管[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1997, (4): 473-476.
Wang Xiaohui, Li Guohui, Yan Fengzhang. New structure of polysilicon emitter phototransistor [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 1997, (4): 473-476.

[6] Yu Z P, Ricco B, Dutton R W. A comprehensive analytical and numerical model of polysilicon emitter contacts in bipolar transistors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, 31(6): 773-784.

[7] Patton G L, Bravman J C, Plummer J D. Physics, technology, and modeling of polysilicon emitter contacts for VLSI bipolar transistors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1986, 33(11): 1754-1768.

[8] Wolstenholme G R, Jorgensen N, Ashburn P, et al. An investigation of the thermal stability of the interfacial oxide in polycrystalline silicon emitter bipolar transistors by comparing device results with high-resolution electron microscopy observations[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(1): 225-233.

[9] Ning T H, Tang D D. Method for determining the emitter and base series resistance of bipolar trasistors [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, 31(4): 409-412.

[10] Hamel J S, Roulston D J, Selvakumar C R. The perforated emitter contact effect[J]. Electron Device Letters, IEEE, 1992, 13(2): 114-116.

作者简介:

黄绍春(1979—),男,高级工程师,主要从事新型光电探测器的研究。