

源极跟随器离子注入工艺对RTS噪声影响分析

王 玮

上海集成电路研发中心有限公司, 上海

收稿日期: 2024年4月2日; 录用日期: 2024年6月5日; 发布日期: 2024年6月18日

摘 要

随机电报信号(Random Telegraph Signal, RTS)噪声是影响CMOS图像传感器图像质量的主要因素之一。伴随着集成电路制造工艺技术的高速发展, 源极跟随器(Source Follower, SF)晶体管栅极尺寸不断缩小, 使得对RTS噪声影响也愈发增大。文章研究了不同源极跟随器离子注入工艺对RTS噪声的影响, 通过工艺优化后, 可获得最佳的RTS噪声改善效果。

关键词

随机电报信号噪声, 源极跟随器, 离子注入工艺, 工艺优化

Analysis of the Influence of Source Follower Ion Implantation on RTS Noise

Wei Wang

Shanghai IC R&D Center, Shanghai

Received: Apr. 2nd, 2024; accepted: Jun. 5th, 2024; published: Jun. 18th, 2024

Abstract

Random Telegraph Signal (RTS) noise is one of the most main factors impacting the image quality of CMOS image sensor. With the rapid development of integrated circuit manufacturing technology, the gate size of the Source Follower (SF) transistors keeps decreasing, and the effect on RTS noise is also increasing. In this paper, the effects of different source follower ion implantation processes on RTS noise were studied, and the best RTS noise improvement results were obtained through process optimization.

Keywords

RTS, SF, Ion Implantation, Process Optimization



1. 引言

CMOS 图像传感器(CMOS Image Sensor, CIS)是一种光电传感器,是摄像头模组的核心元器件,对摄像头光线感知和图像质量的影响起到关键作用[1]。随着工艺制程技术的不断发展,CMOS 图像传感器凭借其以更小的尺寸获得更高的分辨率、高灵敏度以及低成本方面的优势,广泛应用于在消费电子、工业视觉、AR/VR 等领域[2]。

噪声问题是影响 CMOS 图像传感器图像质量的关键因素之一[3],图像传感器中的噪声会使成像质量恶化,同时也决定了图像传感器的信噪比,噪声的改善对于提升 CMOS 图像传感器图像质量有着非常重要的意义[4]。

在 CMOS 图像传感器的噪声分析过程中,闪烁噪声(1/f)是随机噪声的一个重要来源[5]。1/f 噪声的根源是 CMOS 晶体管 Si-SiO₂ 界面处的晶格缺陷在不断的捕获、释放载流子。缺陷的数量和栅氧的面积以及工艺节点密切相关,随着技术节点的发展,晶体管的尺寸不断缩小。当晶体管小到一定尺寸后,理论上会出现 Si-SiO₂ 界面只存在一个缺陷的情况。在这种情形下,CMOS 晶体管 Si-SiO₂ 界面处捕获载流子或释放载流子,所引起的噪声分布现象就是输出 2 个离散的值,此时产生 RTS 噪声[6]。

无论是 1/f 噪声还是 RTS 噪声,其来源都是 MOS 晶体管 Si-SiO₂ 界面处的晶格缺陷。改变退火工艺可以优化栅氧膜质,修复晶格缺陷。但是,需要精准的退火温度和退火时间,而退火温度和时间会影响到各种类型的器件性能,因此对基准工艺是一个较大的改动。同时,从噪声来源考虑,仅仅一个缺陷就能引起 mV 量级的 RTS 噪声,通过退火工艺单纯减少 Si-SiO₂ 界面陷阱数目,对消除 RTS 噪声并无太大帮助[7]。另一种方法是使导电沟道中的载流子远离 Si-SiO₂ 界面,这样也可以减少界面处缺陷对载流子的捕获、释放,进而降低 1/f 噪声和 RTS 噪声。将 CMOS 图像传感器中传统的源极跟随器 NMOS 晶体管做成埋层沟道 NMOS 晶体管,可以实现上述方法。仅需增加一道离子注入即可实现埋层沟道,从而让沟道的最高电位远离 Si-SiO₂ 界面,缺陷捕获沟道中导电载流子的几率也就大大降低,1/f 噪声和 RTS 噪声得到改善[8]。本文以 55 nm CIS 工艺作为基准工艺,通过实验,研究了不同源极跟随器离子注入工艺对 RTS 噪声的影响进而获得最优工艺组合,为实际生产提供参考依据。

2. 实验设计

本文提出五种工艺方案,各方案工艺步骤如表 1 所示。

Table 1. Process step

表 1. 工艺方案

	基准工艺	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
Step 1	Si Substrate	Si Substrate	Si Substrate	Si Substrate	Si Substrate	Si Substrate
Step 2	PW	PW	PW	PW	PW	PW
Step 3	Gate Oxide	BC	Gate Oxide	Gate Oxide	Gate Oxide	BC
Step 4	Poly silicon	Gate Oxide	Poly silicon	Poly silicon	Poly silicon	Gate Oxide
Step 5	NLDD	Poly silicon	F	NLDD	NLDD	Poly silicon

续表

Step 6	Anneal	NLDD	NLDD	F	Anneal	F
Step 7	Spacer	Anneal	Anneal	Anneal	Spacer	NLDD
Step 8	NP	Spacer	Spacer	Spacer	NP	Anneal
Step 9	...	NP	NP	NP	F	Spacer
Step 10	NP

其中，基准工艺主要由 8 个步骤组成，第一步是形成衬底硅(Si substrate)，随后通过离子注入(Implantation, IMP)形成 PW (P 型阱)，第三步通过炉管制作出栅氧化层(Gate Oxide)，第四步通过炉管形成栅多晶硅(Poly silicon)，第五步通过离子注入形成 N 型轻掺杂源漏极(NLDD)，第六步通过退火设备进行高温退火(Anneal)，第七步通过炉管形成栅侧壁阻挡层(Spacer)，第八步通过离子注入形成 N 型源漏极(NP)，后续的金属互联等工艺过程和本文实验无相关性，因此不做描述。

方案一在基准工艺方案的基础上，在 PW 之后、Gate Oxide 之前增加了埋沟(Buried Channel, BC)工艺步骤，具体来说是通过离子注入设备对 SF 器件进行元素注入，具体注入条件如表 2 所示；

方案二在基准工艺方案的基础上，在 Poly silicon 之后，NLDD 之前增加了 F 工艺步骤，具体来说是通过离子注入设备对 SF 器件进行 F 元素注入，具体注入条件如表 2 所示；

方案三和方案四也是增加 F，但和方案二的差异之处在于 F 工艺步骤在整个加工过程中的顺序，方案三的 F 工艺位于 NLDD 之后，Anneal 之前，方案四的 F 工艺位于 NP 之后，方案二、方案三和方案四的共同之处是 F 离子注入均是在 SF 器件区域进行，具体注入条件如表 2 所示；

方案五是将方案一和方案二进行了组合，即同时增加了 BC 和 F 两个工艺，且 F 工艺步骤位于 Poly silicon 之后、NLDD 之前，均是通过离子注入设备对 SF 器件进行元素注入，具体注入条件如表 2 所示。

Table 2. The setting up of experiment condition

表 2. 实验条件设定

	工艺	加工形式	元素	能量(keV)	剂量(cm^{-2})
方案一	BC	IMP	Phos	20	2E12
					4E12
					6E12
					8E12
					1E13
方案二	F (介于 Poly silicon 和 NLDD 之间)	IMP	F	5	5E15
				10	
				15	
				20	
方案三	F (介于 NLDD 和 Anneal 之间)	IMP	F	15	5E15
				25	
方案四	F 位于 NP 之后	IMP	F	15	5E15
方案五	BC + F	IMP	Phos & F	Phos: 20 F: 15	Phos: 6E12 F: 5E15

3. 实验结果与分析

表 3 是方案一的 RTS 测试结果。定义基准工艺的 RTS 相对值(a.u.)为 1, 5 种不同 BC 剂量工艺的 RTS 值最小为 0.51、最大为 1.41, 可看出随着 BC 剂量从 2E12 逐渐增加到 1E13, RTS 值呈现先减小、后不变、再增大的趋势。BC IMP 工艺将磷(Phos)元素注入到了 SF 器件 Gate Oxide 下方的 PW 中, 使得原本是 P 型掺杂的 PW 中形成了由 Phos 元素构成的 N 型埋层沟道, 从而让该 SF 器件沟道的最高电位远离了 Si-SiO₂ 界面, Si-SiO₂ 界面缺陷捕获沟道中导电载流子的几率也就大大降低, RTS 噪声得到了改善。比较 RTS 值可以看出当注入剂量为 2E12 时, 埋层沟道尚未达到最佳效果, 注入剂量达到 4E12 后 RTS 值下降到了 0.52, 此后虽然注入剂量进一步增加到 6E12, RTS 值仅极小的幅度下降至 0.51, 可见 4E12 的注入剂量已经可以很好的形成埋层沟道, 改善 RTS 噪声。

而随着注入剂量从 6E12 继续增加至 8E12、1E13, RTS 值出现了大幅恶化, 这主要是因为形成埋层沟道后 SF 器件的开启电压(V_t)会降低, 且随着 BC IMP 注入剂量的不断增加, V_t 值会逐步下降, 当 SF 器件的 V_t 值过低时, 会导致 SF 器件异常, 表现出的现象即是 RTS 值大幅恶化。

Table 3. The testing results of Option 1

表 3. 方案一测试结果

	工艺	加工形式	元素	能量(keV)	剂量(cm ⁻²)	RTS (a.u.)
方案一	BC	IMP	Phos	20	2E12	0.72
					4E12	0.52
					6E12	0.51
					8E12	1.33
					1E13	1.41

如下表 4 所示是方案二的 RTS 测试结果。5 种不同 F IMP 能量工艺的 RTS 值最小为 0.41、最大为 1.05, 并且可看出随着 F 注入能量从 5 KeV 逐渐增加到 25 KeV, RTS 值呈现先减小后增大的趋势。F IMP 工艺将氟(Fluorine, F)元素注入到 SF 器件栅多晶硅(Polysilicon)中, 栅多晶硅中注入的 F 离子在经过之后的退火工艺, 扩散到 SiO₂ 层和 Si 形成 F-Si 键, 减少了 Si-SiO₂ 界面的悬挂键, 从而减少 Si-SiO₂ 界面缺陷, 降低对 SF 器件沟道中载流子的捕获、释放, 最终改善 RTS 噪声。比较 RTS 值可以看出当注入能量为 5 KeV 时, RTS 值仅从基准工艺的 1 略微下降至 0.97, 理解这个现象需要先了解离子注入工艺的特性, 离子的注入深度随着注入能量增大而加深, 5 KeV 的注入能量过低, 因此注入的 F 元素仅位于 Polysilicon 的上表面, 距离 Si-SiO₂ 界面过远, 因此几乎没有 F 离子到达 SiO₂ 层和 Si 形成 F-Si 键, 不能减少 Si-SiO₂ 界面悬挂键和 Si-SiO₂ 界面缺陷, 也就没有起到改善 RTS 的效果。随着注入能量从 5 KeV 增加到 10 KeV, RTS 值从 0.97 大幅下降至 0.64, 这是因为随着注入能量增加, F 离子注入深度不再位于 Polysilicon 表面, 而是往下向 Gate Oxide 靠近, 更多的 F 离子到达 SiO₂ 层和 Si 形成 F-Si 键, 改善了 RTS 噪声。注入能量从 10 KeV 继续增加至 15 KeV, RTS 值从 0.64 继续下降至 0.41, 但是注入能量进一步增大到 20 KeV、25 KeV, RTS 值反而又大幅恶化到了 0.96、1.05, 15 KeV 的注入能量相比于 10 KeV 的注入能量, 可以让更多的 F 离子到达 SiO₂ 层和 Si 形成 F-Si 键, 改善 RTS 噪声。但当注入能量超过 15 KeV 时, 注入的 F 离子深度比 Polysilicon 和 Gate Oxide 界面(即 Si-SiO₂ 界面)还要深, 换句话说, 注入的 F 离子随着注入能量的进一步增加而远离了 Si-SiO₂ 界面, 越来越少的 F 离子在 SiO₂ 层和 Si 形成 F-Si 键, RTS 的改善效果逐渐变差。

如表 5 和表 6 所示, 比较方案三、方案四和方案二的 15 KeV 能量工艺, F 离子注入的能量、剂量完全相同, 差异之处仅在于 F 工艺步骤在整个加工过程中的顺序, 可以看出 RTS 改善效果显示方案二和方案三相近, 整体效果优于方案四, 这是因为方案二和方案三均是在 Anneal 之前进行的 F 离子注入, 而方案四则是在 Anneal 之后。Anneal 是一种高温退火工艺, 其会导致注入的离子向四周扩散, 也就是说经过 Anneal 后, 离子注入的深度位置会较 Anneal 前发生变化, 因此对于在 Anneal 前进行 F 注入的方案二和方案三, 15 KeV 的能量注入在经过 Anneal 后使其 F 离子深度位于 Si-SiO₂ 界面的最佳位置, 但 Anneal 之后才增加 F 的方案四其 F 离子注入后未能经过扩散, 因此 F 离子深度对于 Si-SiO₂ 界面来说不再是最合适的, 其 RTS 的改善效果也就差于方案二和方案三了。

Table 4. The testing results of Option 2

表 4. 方案二测试结果

	工艺	加工形式	元素	能量(keV)	剂量(cm ⁻²)	RTS (a.u.)
方案二 (介于 Poly silicon 和 NLDD 之间)	F	IMP	F	5	5E15	0.97
				10		0.64
				15		0.41
				20		0.96
				25		1.05

Table 5. The testing results of Option 3

表 5. 方案三测试结果

	工艺	加工形式	元素	能量(keV)	剂量(cm ⁻²)	RTS (a.u.)
方案三 (介于 NLDD 和 Anneal 之间)	F	IMP	F	15	5E15	0.42

Table 6. The testing results of Option 4

表 6. 方案四测试结果

	工艺	加工形式	元素	能量(keV)	剂量(cm ⁻²)	RTS (a.u.)
方案四 (位于 NP 之后)	F	IMP	F	15	5E15	0.72

如下表 7 所示是方案五的 RTS 测试结果。其 BC 工艺 Phos 离子注入剂量是方案一中 RTS 改善效果最好的 6E12, F 工艺 F 元素的注入能量也选择的是方案二中 RTS 改善效果最好的 15 KeV。可以看出, 方案五的 RTS 值是本文所有实验中的最优值 0.24, 既小于条件 2 的最优值 0.51, 也小于条件 3 的最优值 0.41。因此, 通过 BC 工艺离子注入让 SF 器件形成埋层沟道, 可同时叠加将 F 离子注入到 SF 器件的栅多晶硅中, 共同改善 RTS 噪声。

Table 7. The testing results of Option 5

表 7. 方案五测试结果

	工艺	加工形式	元素	能量(keV)	剂量(cm ⁻²)	RTS a.u.)
方案五	BC + F	IMP	Phos & F	Phos: 20 F: 15	Phos: 6E12 F: 5E15	0.24

4. 结论

本文研究了不同工艺对 RTS 噪声的影响, 通过 BC 离子注入工艺和 F 离子注入工艺, 均可以有效改善 RTS 噪声, 提高图像质量。同时, 本文提出同时使用 BC 离子注入工艺和 F 离子注入工艺后, 可获得最佳的 RTS 噪声改善效果, 为生产出低噪声的图像传感器给出了指导方向。

参考文献

- [1] 太田淳. 智能 CMOS 图像传感器与应用(日) [M]. 史再峰, 徐江涛, 姚素英, 译. 北京: 清华大学出版社, 2015: 8-10.
- [2] 孙羽. 小尺寸背照式 CMOS 图像传感器像素结构研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.
- [3] 罗昕. CMOS 图像传感器集成电路: 原理、设计和应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 13-16.
- [4] 杨敏杰, 钱芸生, 严毅赟, 等. 基于 CMOS 图像传感器的像增强器闪烁噪声测试系统[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(2): 325-330.
- [5] 谢凯翔. CMOS 图像传感器中的随机噪声特征分析[J]. 中国集成电路, 2017, 26(9): 5.
- [6] 石文杰. CMOS 图像传感器中列随机电报噪声影响因素的研究[J]. 电子技术(上海), 2019, 48(1): 47-49.
- [7] 唐瑜. 等离子体工艺对 MOS 器件的损伤研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2024.
- [8] 吴萍. 埋沟型源跟随晶体管对噪声的优化研究[J]. 中国集成电路, 2021, 30(5): 50-53+83.