

# 低能量高掺杂磷原子注入经快速热退火后的杂质分布影响因素研究

王韡祺, 黄其煜

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 在半导体器件中, 提高开关速度和降低漏电流或已成为阻碍产业发展的一对无法调和的矛盾。然而半导体产业的蓬勃发展推动了器件制作工艺的不断发展, 超浅结工艺和尖端退火工艺正是基于此发展的。超浅结工艺基于低能高剂量注入条件, 其特点是阱深浅, 器件开关速度快。快速退火工艺其热输入小, 升降温速率快, 在抑制杂质的横向扩散效果显著。本论文基于 55 纳米工艺平台, 以低能高掺杂磷原子注入与快速热退火为案例, 对杂质原子在硅基中的分布及迁移作了一定的分析和试验验证。分析发现, 低能大剂量均匀注入的同时, 经快速退火后, 杂质原子在硅基形成特殊的分布, 其硅片边缘部分呈现杂质偏多, 阻值偏低的现象。浅结注入的阱深较低, 在退火过程中杂质容易通过硅表面溢出, 对阻值变化产生影响。同时, 本文中针对两种扩散模式, 纵向扩散及横向扩散作了相应的试验分析。

**关键词:** 浅结注入; 快速热退火; 原子溢出; 横向扩散; 纵向扩散

**中图分类号:** TN305.99

## Influence factors of impurity distribution in low energy and highly doped phosphorus atoms implanted by RTP

WANG Weiqi, HUANG Qiyu

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** In the semiconductor device, improve the switching speed and reduce the leakage current or has become a hindrance to the development of the industry can not reconcile the contradiction. However, the vigorous development of the semiconductor industry to promote the continuous development of the device manufacturing process, ultra-shallow process and cutting-edge annealing process is based on this development. Ultra-shallow junction process based on low-energy high-dose injection conditions, which is characterized by well depth, device switching speed. The rapid annealing process has a small heat input, a quick rise or cooling rate, and a significant effect in suppressing the lateral diffusion of impurities. Based on the 55nm process platform, the distribution and migration of impurity atoms in silicon base were analyzed and verified by low energy and high doped phosphorus atom implantation and rapid thermal annealing. The results show that the low-energy high-dose uniform injection at the same time, after rapid annealing, the impurity atoms in the silicon-based formation of a special distribution, the edge of the silicon part of the impurities appear too high, low resistance phenomenon. The depth of the shallow implant is lower, and the impurities are easily overflowed through the silicon surface during the annealing process, which affects the resistance change. At the same time, the corresponding experimental analysis is carried out for the two diffusion modes, longitudinal diffusion and transverse diffusion.

**Keywords:** shallow injection; rapid thermal annealing; atomic spillage; transverse diffusion; longitudinal diffusion

## 0 引言

随着半导体产业的蓬勃发展, 器件的工艺水平达到了新的高度, 器件三维不断缩小, 沟道长度不断减小的同时<sup>[1]</sup>, AA 区域(激活区)也越来越浅, 这对注入机台的要求提出了新

**作者简介:** 王韡祺(1989.6-) 男, 工程师, 主要研究离子注入与快速热退火工艺方向

**通信联系人:** 黄其煜, 副教授, 主要研究方向为纳米材料和微加工技术, 长期担任半导体制造工艺实验课程的教学。E-mail: qiyu@sjtu.edu.cn

的挑战。浅结注入主要应用于器件的源漏区、VT 调节区域及 LDD 区域，浅层注入的精度和准度，对器件的性能起着越来越重要的作用。表 1 显示了风冷芯片 CPU 发展趋势。

表 1 CPU 芯片的发展趋势  
Tab. 1 The development trend of CPU chip

产品年	工艺节点	多晶硅线宽/nm	沟道长度/nm	片内时钟/MHz	集成晶体管数	供电电压/V	功耗/W
2003	90nm	107	65	2976	439	1.2	149
2004		90	53	4171	553	1.1	158
2005		80	45	5204	697	1.1	167
2006		70	40	6783	878	1.1	180
2007	65nm	65	35	9285	1106	1.1	189
2008		57	32	10972	1393	1.1	198
2009		50	28	12369	1756	1.0	198
2010	45nm	45	25	15079	2212	1.0	198

快速热退火工艺 RTP（Rapid Thermal Process）是在传统炉管工艺基础上发展起来的热退火工艺，其特点是热输入少，升温速率快，加热时间短，对产能提升作出了巨大贡献。

注入过程时，掺杂离子以离子或离子团的形式进入硅基底内，通过核阻止或电子阻止的形式进行能量衰减，最后被硅基底 trap 住，以间隙原子或空位原子的方式停留在硅基底内。在这个过程中，硅基表面晶格被入射离子或离子团打碎，同时掺杂离子在硅基内被束缚，未能与周围硅原子形成共价键，不能改变电性参数。因此，一般地，注入后会通过快速热退火工艺对硅基表面进行原子修复，同时激活掺杂离子与周围硅原子形成共价键，改善掺杂区域的电性参数，达到工艺要求<sup>[2]</sup>

目前浅层注入机台其注入能量能达到 500KeV，能够满足现有产品工艺的结深要求。RTP 退火机台为退火速度能达到每秒 220℃，最高退火温度达到 1100℃左右。

## 1 注入监控方式及相关问题

在实际生产中，发现低能高剂量注入经退火后出现了边缘阻值偏低的情况，如 IHC 机台的磷元素等。比较 RTP 机台自身的日常监控并没有发现类似的 MAP，本论文正是基于磷元素掺杂及退火后产生的特殊 MAP 对磷杂质分布开展的一系列讨论及验证。

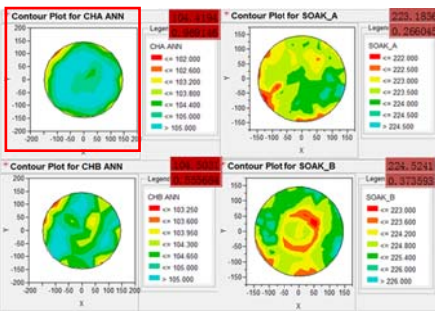


图 1 不同机台杂质分布图  
Fig. 1 Different machines impurity profile

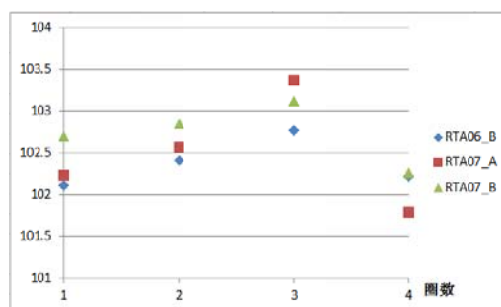


图 2 不同位置的电阻值

Fig. 2 The resistance value under different location

磷元素为 V 族，最外层有 5 个电子，在与硅基结合时呈现得电子状态，一般地磷元素注入为 N-type 注入，高掺杂磷原子注入应用于 NPO-IMP 及 PMOS 的 NSD 注入等，对改善多晶硅阻值及 PMOS  $I_{dsat}$  具有重要意义<sup>[3]</sup>。

为监控磷元素注入的稳定性，offline 条件下对注入机台实施了与产品工艺同能量同源种的注入监控，四天一次，收集数据，监控机台性能。



图 3 磷原子日常监控流程

Fig. 3 Phosphorus atoms daily monitor process

注入机台日常监控采用新下线的晶圆片，在高电流注入机台磷原子掺杂后，经 RTP 机台快速退火，最后测得 RS，通过 RS 阻值平均值、STD 及阻值 MAP 分布可以获得注入机台当前的性能状况，同时指导线上产品的作业顺序及设备保养频次。

注入条件选用磷离子，8KeV， $1 \times 10^{15}$  离子/cm<sup>2</sup>，该注入深度与线上产品一致，注入剂量与产品在同一水平，因此能够模拟产品的实际注入情况。快速退火条件为 1050℃，30sec，SOAK 模式，理想状况下，该退火条件能够将注入离子完全激活，排除 RTP 机台对 RS 量测的影响<sup>[4]</sup>。

## 2 高剂量掺杂退火后的杂质分布模型及影响因素分析

P 日常监控流程如图 3 所示，其退火后杂质的分布如图 4 所示，其中在整个系统中共存在 3 种介质，基底单晶硅、氧化硅（自然氧化膜、IMP 再生长氧化膜）及周围环境<sup>[5]</sup>。

注入过程中，磷离子穿过自然氧化膜薄膜后进入硅基底，由于低能量注入，原子间的碰撞主要以核阻止方式进行，注入离子在碰撞过程中能量衰减，最后停留在硅基底中，这部分杂质通过 RTP 激活后与硅基形成共价键，提供额外的电子参与导电，决定了 RS 阻值大小。

另一部分磷离子在与氧化层碰撞中能量损失较大，未穿透氧化层，最后停留在氧化层中，由于氧化硅为绝缘体，因此这些掺杂离子并不能参与导电，不会影响 RS 阻值<sup>[6]</sup>。

考虑到注入能量仅为 8KeV，同时磷元素原子量为 31，原子体积较大，其 PN 结深非常浅，8KeV 能量时峰值浓度所处结深大概在 144Å 左右，因此杂质原子容易通过纵向扩散向大气环境溢出。这部分损耗在浅注入过程中是普遍存在的，通过覆盖薄膜的方式可以抑制这种扩散<sup>[7]</sup>。

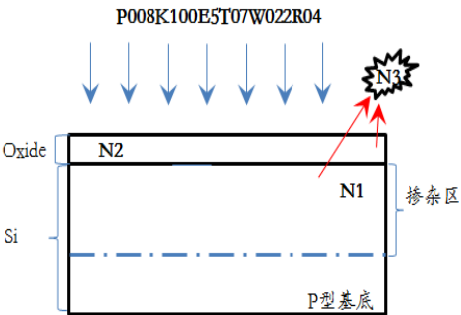


图 4 注入及退火后杂质分布示意图

Fig. 4 Injection distribution map after impurity and annealing

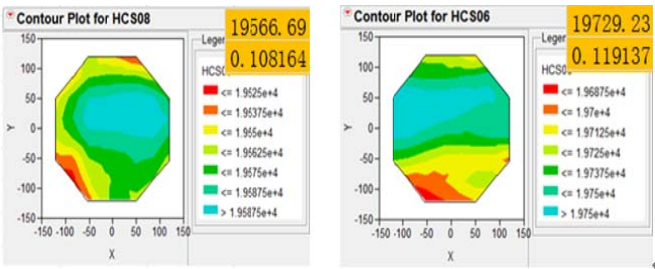


图 5 不同机台注入后的 TW 测试图

Fig. 5 Different machines TW test after injection

在建立模型之前，需要对注入的均匀性进行判定。通过 Thermal Wave 能够测量注入完成后硅片表面晶格的受损程度，从而验证不同区域注入量的均匀性。分别对 HCS08 及 HCS06 注入 wafer 作 TW 测试，测量结果表明注入均匀性非常良好，stdev 仅为 0.11% 左右。

基于注入稳定的前提下，对这种特殊 RS MAP 建立模型并试验验证，借以此分析不同影响因素下，磷杂质经快速退火后在硅基底的分布状况。

### 2.1 内外圈温差引起的杂质分布不均匀模型：

考虑 RTP 工艺条件下，在主工艺 SOAK 阶段时，若边缘温度较中心温度有差，会导致边缘原子激活量增多，对应的 RS 阻值会减小<sup>[8]</sup>。事实上，快速热退火 AMAT 机台以 7 根距离中心不同距离的温度探针进行闭环控温，由于不同区域的灯管数目不一样，对整体 RS 阻值的影响也会相对不同。因此内外圈的温度调节是一个相对的概念，是基于 RTP 日常监控数据进行实时调节的。RTP 日常监控选用 B 元素注入，30KeV,  $3 \times 10^{15}$  离子/cm<sup>2</sup>，在 920℃ 退火 30sec 后比较其 RS 数值。

在磷注入退火温度的基础上增加 10℃，计算出磷掺杂退火的敏感系数为 0.285ohm/℃，然而 RTP 机台日常监控敏感系数为 2ohm/℃，因此若是主工艺阶段时边缘差异引起的外圈阻值偏低，则 RTP 机台日常监控可以很好地显现出来。但是从 RTP SOAK 日常监控均匀性仅为 0.27% 来看，主工艺阶段的内外圈温度差异不能引起磷杂质的分布不均匀。

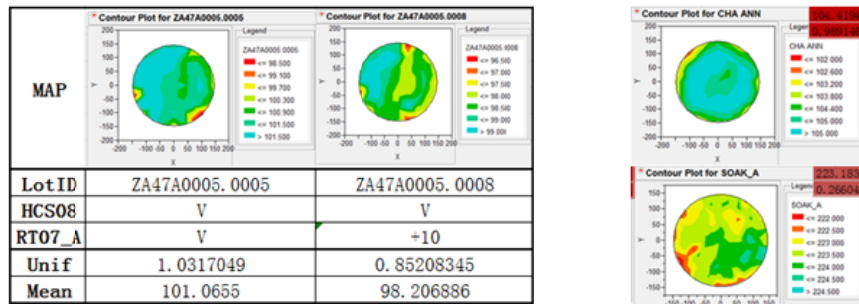


图6 磷掺杂的温度敏感系数及 RTP 日常监控图比较

Fig. 6 The temperature sensitive coefficient of phosphorus doping and RTP, daily monitoring figure

## 2.2 内外圈温差引起的杂质分布不均匀模型:

如上所述,低能量高掺杂注入时,峰值浓度区域(结深)位于硅基表面仅为144Å的位置。在退火过程中,高温使得原子动能提高,扩散运动加剧,在此过程中,部分掺杂离子通过纵向扩散穿透硅基和氧化层,溢出到周围环境中。

在快速退火时,一般添加小氧气体在硅片表面形成一层氧化膜,防止磷原子的大量溢出<sup>[9]</sup>。退火程式中氮气流量为20slm,氧气流量为0.5slm。在注入后非晶化的硅片表面,能快速地形成氧化膜<sup>[10]</sup>。

此模型需要验证两种情况:1.有无氧化层对RS量测是否会造成影响;2.边缘与中心氧化层差异是否会影响磷原子的溢出效率;

### 2.2.1 硅片表面氧化层对RS阻值的影响:

同机台注入条件下两片磷源种日常监控,分别对其退火,一个通小氧,另一个纯氮气退火,结果发现,纯氮气环境下退火的硅片阻值为188.92ohm,约为前者的两倍。说明RTP过程中磷原子的扩散溢出是十分明显的,同时通氧气可以较好地抑制这种扩散。

加大氧气流量,氧化层膜厚明显增大,氧化层最厚为40.6Å,最薄为32.41Å,但其对应的RS阻值却差异不大,均为102ohm左右,据此认为,氧化膜厚度在30Å以上时,薄膜厚度已经足够阻止磷原子的高温扩散溢出现象。

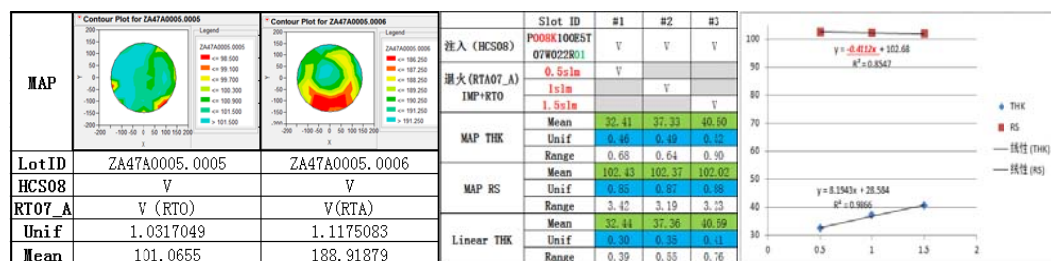


图7 退火过程中氧气流量与薄膜厚度及原子溢出率的关系

Fig. 7 Oxygen flow relationship between film thickness and the overflow ratio of atoms in annealing process

### 2.2.2 内外圈氧化层膜厚差异对磷原子溢出的影响:

Linear Scan THK 能够清楚地看出,每一片硅片的均匀性约为0.35%, range 在1Å以下。



基于上述结论，边缘及中心区域膜厚均在 32Å 左右，在此膜厚区间内，基于 3.2.1 结论，磷杂质的溢出差异不明显。

因此，快速退火过程通小氧之后，其快速生长的氧化层很好地抑制磷原子的纵向扩散，边缘与中心区域的溢出效率差异不大。

2.3 纵向扩散模型：

纵向扩散描述了磷原子沿着阱深方向上的扩散。对于硅基表面的磷原子，有两种纵向扩散方向，一是硅基表面磷原子与氧化膜磷原子之间的动态扩散；二是硅基表面磷原子往深阱方向的扩散。

2.3.1 磷杂质原子往氧化膜方向的扩散：

由于氧化膜为绝缘体，其中的磷原子不贡献 RS，因此某区域磷原子若进入到氧化膜部分较其他区域少的话，其单位面积（假设其阱深相同）的磷原子数目越多，相应地 RS 越小。硅基表面杂质扩散存在一个分凝系数 k，即将在硅内的杂质平衡浓度与二氧化硅内杂质的平衡浓度之比。P 原子 k>10，且在氧化硅中扩散较慢，容易堆积在硅表面。由于膜厚增大，RS 阻值并未发生变化，可认为原子激活量是一定的，且往氧化膜方向扩散的原子也是固定的。

2.3.2 磷杂质原子往深阱方向的扩散：

在之前的推测中，我们认为各区域磷原子的注入深度经退火后是一致的，因此计算 Rs 时未考虑注入深度，但如果不同区域表面及次表面磷原子往深阱方向扩散速度有不同的话，RS 值有所不同。

$$Rs = \frac{\rho}{S} = \frac{1}{q * n * \mu_n * h * d}$$

其中：ρ 为电阻率，n 为载流子浓度，μ 为迁移率，h 为阱深，d 为量测探头相关常数。

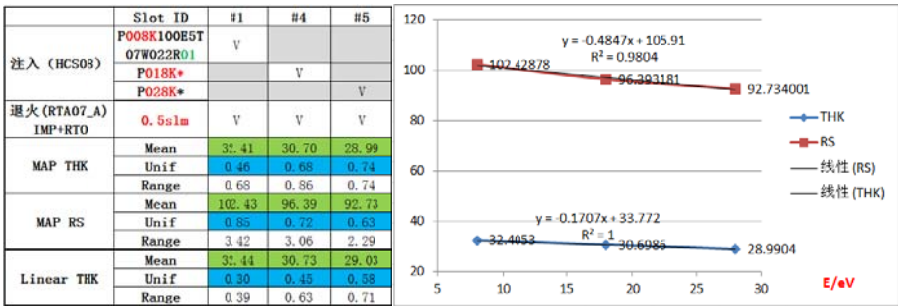


图 8 纵向扩散模型实验数据

Fig. 8 Longitudinal diffusion model experimental data

2.3.3 实验设计：

调整注入能量，改变阱深，模拟退火中的纵向扩散机制。试验得知，在注入能量不断增大的情况下，表面氧化膜厚度越来越小，同时 Rs 阻值也逐渐减小。在能量逐渐加大的过程中，存在 3 个因素影响方块电阻。

首先，注入能量增大，在核阻止碰撞机制下，硅片表面的非晶化程度加大，在退火过程中应该更容易长氧化层，但这与试验结果相悖。实际上，相关人士告知，磷在氧化膜生长过程中起到催化剂的作用，在能量较高的情况下，同样的注入剂量，穿透自然氧化物进入硅基的磷原子数目较大，同样地，经退火后有效的载流子数目也相应较大，阻值相应减小，同时氧化膜生长的催化剂也相应减小，这也解释了膜厚相对较薄的现象。

其次，注入能量增大后，结深增大，即  $h$  增大， $RS$  与  $h$  成反比，因此  $RS$  较小。

另外，深阱条件的原子对激活能的要求也相应不同，同温度条件下，激活率也不尽相同，这也是影响深阱注入退火  $RS$  的一个因素。

在本试验中，由于能量改变的幅度相应较小，第 3 因素的影响相对较小，但前 2 个因素的影响还是很直观的，能量对阻值的敏感性系数大约为  $0.48\text{ohm/Kev}$ 。所以，如果纵向扩散的长度与增大  $5\text{Kev}$  能量所达到的阱深在同一数量级上的话，则这种机制是完全可以改变局部区域的方块阻值的。

## 2.4 横向扩散模型：

在此模型下，假定阱深是固定的，因此面密度与浓度具有等价关系。

在注入初始条件下，均匀性较好，然而退火完成后，边缘的面密度明显高于其他区域。RTA07 CHA 与 RTA06 CHB 相比，其磷原子的扩散方向如下。

负值表示净扩散的前进方向

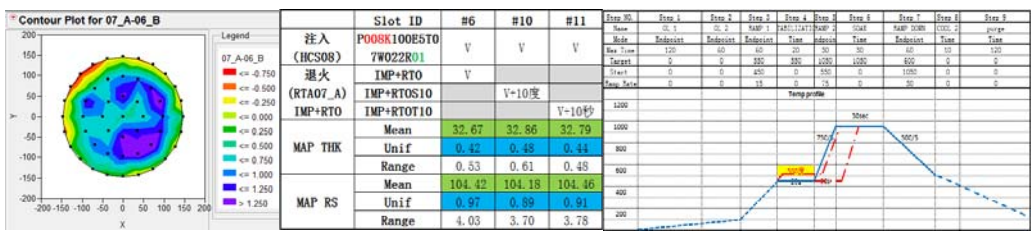


图 9 横向扩散模型实验数据

Fig. 9 Lateral diffusion model experimental data

与 RTA06 CHB 相比，RTA07 CHA 在其扩散基础上，以第三圈为源，向第四圈进行扩散。图中可以清楚的看出，第三圈明显阻值偏大，第四圈明显偏小。但第三圈的最大值与第四圈的最小值不在临近区域内。可以猜测，磷原子在 RTA06 CHB 中与在 RTA07 CHA 中的扩散方向有所不同，导致在最终两者的结果中出现偏差。

考虑到主工艺阶段 RTA07 CHA 与其他腔室并无差异，因此对温度曲线的其他部分做试验验证。

调节主工艺阶段之外的小平台温度及时间，并分析磷原子的扩散方向<sup>[11]</sup>。

在增大小平台温度后，第 3 圈内 3 个红色区域分别为磷原子聚集方向，同时左半边的原子逃离方向由于阻值较小，干扰较多。

延长小平台时间，第 3 区域也存在一些零散的原子聚集区域，相应地，第四区域有磷原子往内圈靠近。

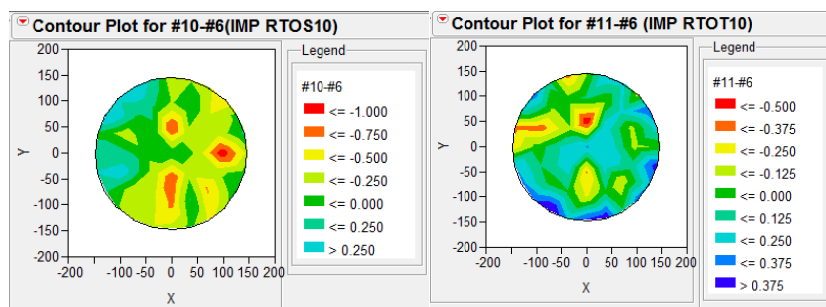


图 10 横向扩散模型实验数据

Fig. 10 Lateral diffusion model experimental data

### 3 结论:

本论文基于 55nm 工艺平台分析了低能浅层注入经快速热退火后的杂质分布影响因素, 得到结论如下:

- 1) 浅层注入由于阱深较浅, 杂质原子容易在退火中溢出, 退火时通入小氧能很好地抑制这种现象; 同时对 8KeV 磷元素注入而言, 当退火形成的氧化层薄膜厚度超过 30Å 后, 抑制效果已不明显。
- 2) 纵向扩散包括杂质原子在氧化层与硅基底之间的动态扩散和杂质原子向深阱方向的扩散两个过程。试验表明, 前者的扩散过程相对稳定, 动态平衡在整个硅片表面维持的很好; 深阱方向的扩散长度若与增大 5KeV 能量的注入深度相当的话, 此扩散模型将在杂质分布过程中起主要影响作用。
- 3) 横向扩散模型中在保持阱深不变的条件下, 试验分析了杂质原子在硅基中的横向迁移。通过延长升温过程中的平台温度和时间间接增大热输入, RS MAP 显示出了杂质迁移的方向, 但试验结果需要重复性试验来验证其准确性。

在半导体工艺过程中, 注入模块和快速热退火模块是少数不能通过后值量测来确认工艺过程的部门, 这就给注入及退火工艺的准确性带来了挑战。日常的监控尤其显得重要, offline 结果需能够模拟产品的工艺过程, 本论文正是基于此目的开展的。当然本文仍然存在很多待验证的结论或未考虑的模型, 然则抛砖引玉的目的已达到。

### 致谢

衷心感谢公司本部门其他人员的启发和指导, 使本文能够顺利完成!

### [参考文献] (References)

- [1] Luo Zu-Ying, et al, Power Consumption and Process Variations : Two Challenges to Design of Next-generation ICs. Chinese Journal of Computer, 2007,7(30).
- [2] 周庆刚. 尖峰退火在深亚微米超浅结中的应用[J]. 集成电路应用, 2008(6):45-46.
- [3] Nieh C F, Ku K C, Cheng N H, et al. Shallow junction formation and high dopant activation rate of MOS devices: US, US 8039375 B2[P]. 2011.
- [4] Frantsuzov A A, Boyarkina N I, Popov V P. Decrease in effective electron mobility in the channel of a metal-oxide-semiconductor transistor as the gate length is decreased[J]. Semiconductors, 2008, 42(2):215-219.
- [5] Sun W, Shin H. Substrate doping concentration dependence of electron mobility using the effective deformation potential in uniaxial strained nMOSFETs[C]// TENCON 2013 - 2013 IEEE Region 10 Conference (31194). IEEE, 2013:1-4.
- [6] Sun W, Shin H. Substrate doping concentration dependence of electron mobility using the effective



deformation potential in uniaxial strained nMOSFETs[C]// TENCON 2013 - 2013 IEEE Region 10 Conference (31194). IEEE, 2013:1-4.

[7] 施敏. 半导体器件物理与工艺[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2012.

5 [8] Chen D H, Dewitt D P, Tsai B K, et al. Effects of Wafer Emissivity on Rapid Thermal Processing Temperature Measurement[J]. 2002, 684(1):59-67

[9] Ravindra N M, Abedrabbo S, Chen W, et al. Temperature-dependent emissivity of silicon-related materials and structures[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1998, 11(1):30-39

[10] 王军喜, 刘喆, 魏同波, 等. 第 3 代半导体材料在光电器件方面的发展和应用[J]. 新材料产业, 2014(3):18-20

10 [11] Zhang J F, Sii H K, Groeseneken G et al. Hole trapping and trap generation in the gate silicon dioxide[J]. IEEE tans. On Electron Devices, 2001 48(6):1127-1135.