

一种基于齐纳和雪崩击穿的 5.1V 稳压二极管设计与验证

寇春梅 林丽 胡高康 王涛 吴建伟

中国电子科技集团公司第五十八研究所 江苏无锡 214072

DOI:10.12238/ems.v7i7.14317

[摘要] 针对 5.1V 稳压二极管的漏电流和硬击穿难点, 设计了一种 5.1V 稳压二极管器件, 结合 TCAD 仿真和快速热退火工艺优化器件性能, 分析了器件主要电参数及优化方法; 器件稳压值 V_{zt} 参数一致性提高到 $5.1V \pm 2\%$ 以内, 反向漏电流控制在 $15\mu A @ 4.2V$ 以内, 动态电阻降至 $5.0\Omega @ 5mA$, 温度系数控制在 $\pm 0.023\%/^{\circ}C$, 该设计提高了稳压二极管器件的电性能和量产稳定性。

[关键词] 齐纳击穿; 雪崩击穿; 稳压二极管; 动态电阻; 温度系数; 参数一致性

1 引言

稳压二极管是一种电阻在达到反向击穿电压前极高、之后极低并能在电流增大时保持反向电压基本恒定的器件, 主要用于稳压、参考电压、电平转移、限幅及保护电路系统^[1]。

稳压二极管包括单管和集成管两类, 前者是单一具有独立封装的二极管器件, 应用在 PCB 上起到稳定电压作用; 后者集成在芯片 (集成电路) 中, 称之为集成稳压二极管或集成齐纳二极管^[2]。稳压二极管的最重要参数是稳定电压 V_{zt} , 即稳压二极管在某规定的反向电流 (比如 5mA、10mA、20mA 等) 下的反向击穿电压^{[3][4]}。

随着现代超大规模集成电路的快速发展, 超深亚微米工艺已成为集成电路加工工艺的主流。为了降低集成电路的功耗, 目前电路的工作电压越来越低, 工作电流越来越小。对作为低温漂低压稳压应用的 5.1V 稳压二极管的需求更为迫切^[5], 对其性能要求也更高。制作 5.1V 低压稳压二极管需要制作高掺杂的 PN 结, 由于平面工艺的扩散工艺较难掌握, 因此反向漏电流以及动态电阻等参数也难以控制, 所以生产低压齐纳管具有较高难度, 在晶圆制造中, 稳定电压 V_{zt} 的离散性 (一致性) 是工程人员最关心的品质问题^[5]。本文针对单管 5.1V 稳压二极管特性和其均匀性开展研究。

2 稳压二极管设计

5.1V 低压稳压二极管的击穿机理主要是隧道击穿和雪崩击穿的结合。隧道击穿是在强电场下, 由于隧道效应, 使大量电子从价带穿过禁带而跃迁到导带引起的击穿现象。区别于雪崩击穿, 漏电流较大, 击穿电压表现“较软”, 因此制备低压稳压二极管是比较困难^[6]。其制造工艺主要包括合金法、外延法和扩散法^[7], 文中 5.1V 稳压二极管采用外延法工艺技术开展研究。

2.1 器件结构设计

平面型 P+N-结是最为常用的低压稳压二极管结构, 其主要特点是制造工艺简单, 结深通过离子注入能量、退火温度和时间控制。主要难点是 Si/SiO₂ 表面处的能带弯曲控制和 P+区两侧体内头部曲率如何做的更为圆润, 降低这两处在反向偏置时的电场强度, 抑制漏电水平, 改善击穿电压表现“较软”的问题。通过低压化学气相淀积二氧化硅方法, 减少热氧化厚度, 减少 Si/SiO₂ 由于氧化中磷元素由于还原性大于硅而产生大量析出, 控制该处硅 N 型浓度增加幅度, 维持表面 P+N-结击穿电压大于体内。增加 P 型离子注入深度, 适当增加快速热退火温度和时间, 可降低 P+区两侧体内头部曲率, 抑制该处的击穿电压下降幅度。

2.2 衬底材料设计

衬底材料设计采用外延片, 外延部分的电阻率一般较高,

而衬底部分的电阻率则较低, 期望有较小的动态电阻, 应选电阻率较低的单晶片作为衬底材料^[8]。按照器件结构设计采用近似单边突变结 (P+/N-/N+), 外延 N-电阻率 (N 型杂质浓度) 是关键参数。击穿电压为 4 至 5V 时, 由硅中突变结击穿电压与杂质浓度的关系可以估算得衬底杂质浓度为 $2.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 查电阻率与杂质浓度的关系得到约 $0.015\Omega \cdot \text{cm}$ ^{[9][10]}。考虑到不同晶向形成二氧化硅的固定电荷与界面态密度^{[7][8]}, 同时与 CMOS 工艺线兼容, 确定晶向 <100>; 材料规格为 N+衬底 (电阻率 $0.003\Omega \cdot \text{cm}$), 外延 N<100>6.0 μm , 电阻率 $0.015\Omega \cdot \text{cm}$ 。

2.3 工艺集成设计

本文提出的 5.1V 稳压二极管机构设计三个光刻版次, 获得良好的性能和优秀的成本控制。其主要工艺流程如图 1 所示: 外延材料片下料进线后, 热氧化生长 860nm 的氧化层, 然后有源区光刻和湿法辐腐蚀二氧化硅, 热生长薄二氧化硅 60nm 作为 P 型离子注入的掩蔽层, 注入 BF₃ 离子形成 P+掺杂区域, 低压化学气相淀积二氧化硅 (LPEOS) 350nm 后, 第二次用接触孔版光刻和腐蚀, 形成接触孔区域, 淀积钛 (Ti) 和铝 (Al) 金属, 第三次用金属版光刻和湿法腐蚀金属铝和钛, 形成金属电极 (也是稳压二极管的阳极 anode), 最后合金、背面减薄、背面金属化形成背面金属电极 (也是稳压二极管的阴极 cathode)。其形成的稳压二极管的芯片剖面结构如图 2 中的 a)、b)、c) 所示。

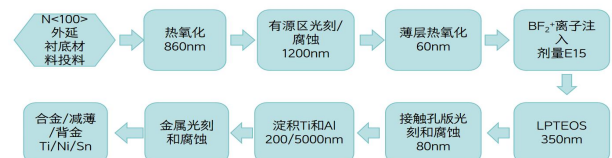
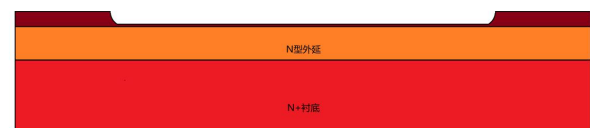
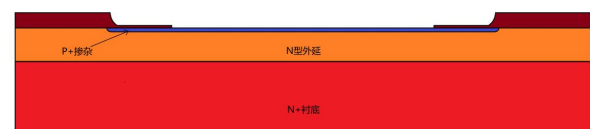


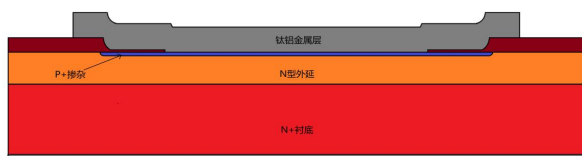
图1 稳压二极管三次光刻简要流程



a) 有源区光刻及腐蚀后稳压二极管剖面结构



b) 接触孔光刻和腐蚀后稳压二极管剖面结构



c) 金属光刻和腐蚀后稳压二极管剖面结构

图2 稳压二极管三次光刻流程和器件结构示意图

3 关键电参数测试验证

根据前面设计结构及工艺流程,对5.1V稳压二极管安排投料进行生产验证,在晶圆背面金属加工完成后利用Keithley 4200-SCS型测试系统对稳压二极管芯片进行伏安特性测试,在测试过程中给稳压二极管施加反向电流,电流设置从0mA至20mA,步长为0.25mA,每施加一次电流信号,其伏安特性曲线如图3所示。

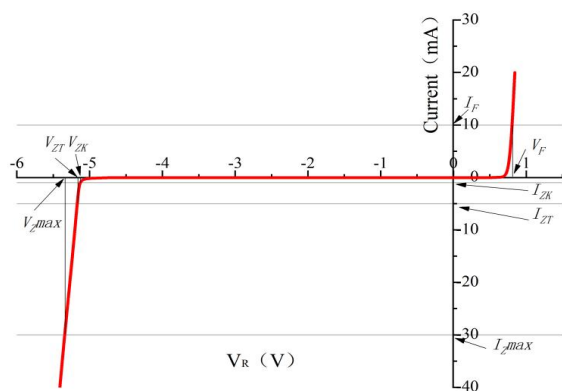
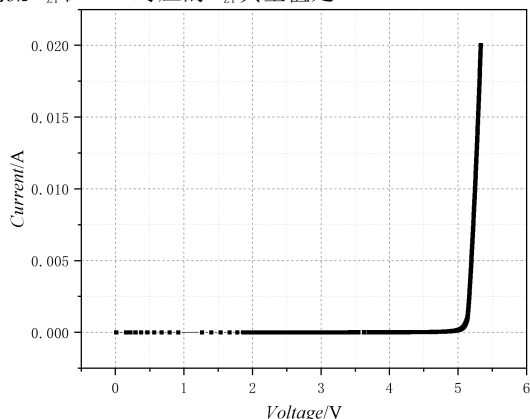


图3 稳压二极管伏安特性曲线

3.1 稳定电压 V_{ZT}

稳定电压 (V_{ZT}), 也成为稳压档位, 是指稳压二极管在反向击穿后趋于稳定工作时的电压值, 对于特定型号的单一稳压二极管来说, 其 V_{ZT} 是这一电压范围内相对确定数值。反向电压 V_R 从0V增加到电压 V_{ZMAX} 时, 反向漏电流一直比较小, 但是当反向电压 (绝对值) $V_R > V_{ZT}$ 时, 反向漏电流急剧增加而电压变化很小, 这一段区域即为齐纳击穿区, 一般来说也是稳压二极管工作区域。本文设计的稳压二极管 V_{ZT} 为 $5.1V \pm 2\% @ 5mA$ ($5.0V \sim 5.2V$), 稳定电流 I_{ZT} 是指稳压二极管在反向击穿后位于稳定工作区域时的反向漏电流。从下图4中, 稳定电流 I_{ZT} 在5mA对应的 V_{ZT} 典型值是5.16V。



(a) 5V1稳压二极管反向I-V曲线

图4 5.1V稳压二极管反向IV曲线

稳压温度系数 α 按照公式(1), 其单位是%/°C, 其中 ΔT 是温度变化量, ΔV_{ZT} 是温度变化后稳压值变化量。图5中125°C时稳压值5.28V, 25°C时稳压值5.16V, 计算得到稳压二极管稳压温度系数 α 为0.023%/°C。

$$\alpha = \frac{\Delta V_{ZT}}{V_{ZT}} / \Delta T \quad \text{公式 (1)}$$

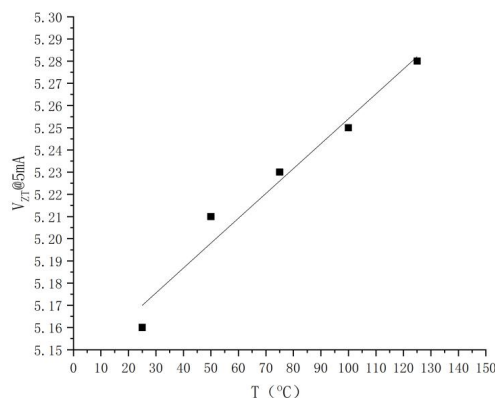


图5 5.1V稳压二极管温度系数图

3.2 反向漏电流 I_R

反向漏电流是指在二极管反向偏置电压时, 流过PN结的微小电流, 理想状态下, 二极管在反向偏置时应完全截止, 但实际上, 由于材料特性和制造工艺的影响, 总会有一些少子 (电子或空穴) 在反向电压的作用下穿过PN结, 形成漏电流。5.1V稳压二极管一般测试1.0V、2.0V、4.0V下的漏电流; 硬击穿加严指定加测4.2V偏置电压下提取反向漏电流。如下图6所示, 与文献[5]中所展示的5.1V稳压二极管反向漏电流119 $\mu A @ 4.2V$ (补充测试) 相比较, 新设计的结构在反向漏电参数上显著改善到6.25 $\mu A @ 4.2V$, 表明在设计有相应改进和提升。

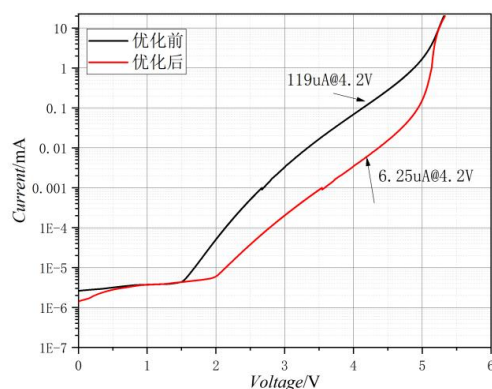


图6 设计优化后的稳压二极管反向漏电流改善情况

3.3 齐纳阻抗 Z_Z

齐纳阻抗, 也被称为动态电阻, 可以表征稳压二极管的稳压性能, 具体是指针对稳压二极管在反向击穿区内某一定电流处 V_Z-I_Z 曲线的斜率, 也就是 $Z_Z = \Delta V_Z / \Delta I_Z$, 由此可以得出如稳压二极管的齐纳阻抗越小, 在同样电流变化量 ΔI_Z 下引发的电压变化量 ΔV_Z 也就越小, 反向伏安特性曲线就会越为陡直, 稳压性能也会越好。

齐纳阻抗在实际测试中一般用 1KHz 的频率测量，其值大小与稳定电压和稳定电流等方面有关，当随着电流增大时齐纳阻抗总是减少。在实际应用中，对稳压二极管在电流在 I_{ZK} 和 I_{ZT} 这两点的齐纳阻抗 Z_{ZK} 、 Z_{ZT} 需要重点关注，可以较好的体现稳压二极管性能。 I_{ZK} 电流取值可选择反向击穿曲线拐点处，通常认为反向漏电流达到 1mA 时二极管已处于反向击穿状态，因此在小功率稳压二极管中 I_{ZK} 电流取值 1mA。 I_{ZT} 电流通常是指在极限功率 1/4 处电流，在小功率稳压二极管中 I_{ZT} 电流一般取值 5mA。稳压二极管允许通过的最大反向漏电流称为最大稳定电流 I_{Zmax} ，最大稳定工作电流与芯片尺寸、稳定电压、封装形式等有关。在稳压二极管实际应用中，一般工作电流不能长时间超过最大稳定电流，否则稳压二极管的 PN 结可能会因过热而损坏。

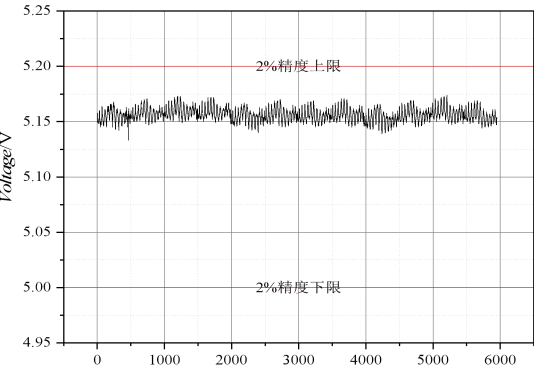
表 1 设计优化后的 5.1V 稳压二极管与之前同型号电参数比较

型号	V_{ZT}/V	Z_{ZK}/Ω @1mA	Z_{ZT}/Ω @5mA	Z_{ZMAX}/Ω @20mA	$I_R@2.0/V$	$I_R@4.2/V$	
5.1V	5.16	27.51	4.12	1.34	6.1pA	6.25μA	优化后
5.1V	5.11	259	28.4	2.01	10nA	119μA ^a	文献 [5]

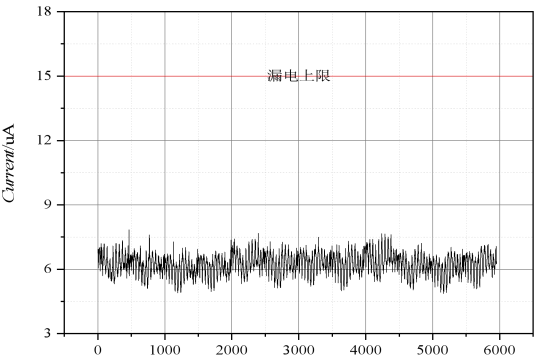
a 按照文献[5]同条件稳压二极管补充测试结果

4 圆片核心电参数及均匀性优化

低压稳压二极管晶圆片其主要的核心电参数参数有稳定电压 V_{ZT} 以及对硬击穿特性表征的反向漏电流 $I_R@4.2V$ 。5.1V 稳压二极管在小电流 250μA 时反向击穿电压在 4.65V 左右，在反向电压 4.2V 时漏电流在 6.25μA 左右，软击穿现象控制好。从测试结果统计法分析（如图 7），稳定电压 V_{ZT} 能够很好地控制在±2%范围内，同时其反向漏电流 $I_R@4.2V$ 完全满足 15μA 以内水平。



(a) 5.1V 稳压管批内 V_{ZT} 分布



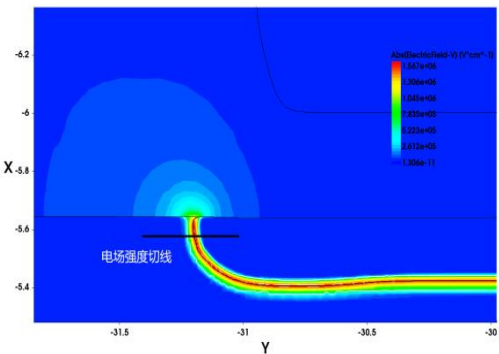
(b) 5.1V 稳压管批内 I_R 分布

图 7 5.1V 档位稳压二极管批内关键参数分布情况

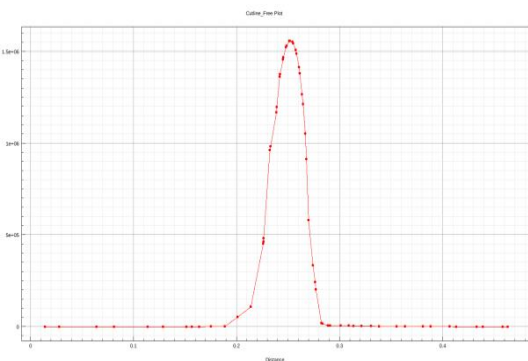
5 分析讨论

文献表明在强电场下由于隧道效应，使大量电子从价带穿过禁带而进入到导带所引起的一种击穿现象。实验表明，对于重掺杂的锗、硅 PN 结，引起隧道击穿所需的电场强度约为 $10^6 V/cm$ 。当击穿电压 $V_{BR} < 4Eg/q$ 时，一般为隧道击穿；当 $V_{BR} > 6Eg/q$ 时，一般为雪崩击穿；当 $4Eg/q < V_{BR} < 6Eg/q$ 时，两种击穿机构都存在^[6]。通过 5.1V 稳压二极管稳压值的温度系数为正 0.023%/℃，符合雪崩击穿主导的温度特性规律，这表明器件击穿机理以雪崩击穿为主导，同时存在齐纳击穿的混合机制。

通过 TCAD 仿真电场分布（图 8）可见，在 5.1V 工作点时，P+N-结内部最大电场强度超过 $1.0 \times 10^6 V/cm$ ，大于雪崩击穿的临界场强（ $4 \times 10^6 V/cm$ ），而表面区域因界面态影响产生局部场强增强效应，诱发少量隧道电流。



a) 5.1V 稳压二极管击穿时 P+N-结电场分布



b) 5.1V 稳压二极管电场峰值强度

图 8 5.1V 稳压二极管击穿时电场情况

按照 TCAD 仿真，其反向漏电流密度较大的区域是 P+掺杂的两端，由于该位置 PN 结存在较大曲率，电场相对集中漏电流大。为验证推测，设计了不同的 P+区 BF_2^+ 的不同注入剂量（如图 9 所示），随着剂量增加，其退火形成的 P+区深度随之增加，P+掺杂的两端曲率相应减小，电场强度逐步减弱，反偏电压在 4.2V 时， BF_2^+ 注入剂量在 $4E15$ 到 $7E15$ （相较于 $1.5E15$ 到 $4E15$ 区间），其漏电流逐渐下降到相对稳定区域。继续增加注入剂量并无法使其漏电流进一步下降，其主要原因是剂量增加使晶格失配大幅提高，退火后也有大量的晶格缺陷陷在 PN 结区，这些缺陷增加的漏电通道。

因此在设计三次光刻版的稳压二极管结构中，影响硬击穿特性的主要是 P+区两端的曲率，通过适当的 BF_2^+ 注入剂量增加，可控制该区域的结深和曲率（如图 10 所示），从而得到良好的反向漏电特性。

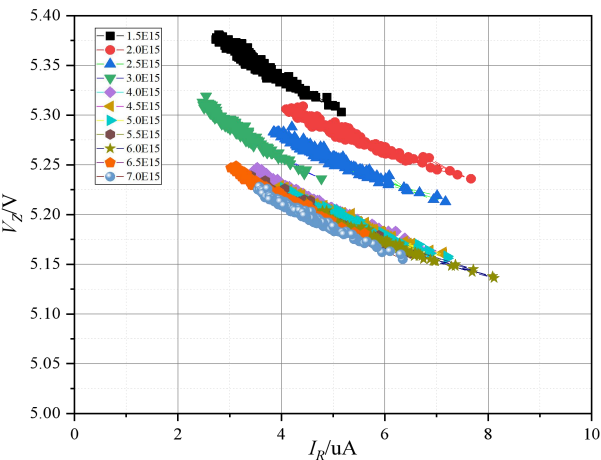


图 9 不同 BF_2^+ 注入剂量条件下反向漏电流片内分布
针对反向漏电流的优化机制，快速热退火（RTA）工艺为 $1050^\circ\text{C}/30\text{s}$ 条件下，杂质横向扩散长度得到有效控制，呈现平滑结面形貌，图 10 和表 2 展示了 BF_2^+ 注入剂量对漏电流的调控规律。当剂量从 $1.5\text{E}15\text{ cm}^{-2}$ 增至 $3.0\text{E}15\text{ cm}^{-2}$ 时，结深由 $0.1961\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $0.2213\text{ }\mu\text{m}$ ，曲率半径从 $0.160\text{ }\mu\text{m}$ 增大至 $0.185\text{ }\mu\text{m}$ ，此时反向漏电 I_R 下降较为显著；当剂量从 $4.0\text{E}15\text{ cm}^{-2}$ 增至 $7.0\text{E}15\text{ cm}^{-2}$ 时，结深由 $0.2301\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $0.2454\text{ }\mu\text{m}$ ，曲率半径从 $0.196\text{ }\mu\text{m}$ 增大至 $0.215\text{ }\mu\text{m}$ ，此时反向漏电 I_R 保持稳定；继续增加 BF_2^+ 注入剂量，反向漏电 I_R 出现增加，其中原因是注入诱导缺陷密度（主要是间隙原子和空位）显著增加产生 G-R 电流主导的额外漏电通道，验证了优化剂量窗口的必要性。

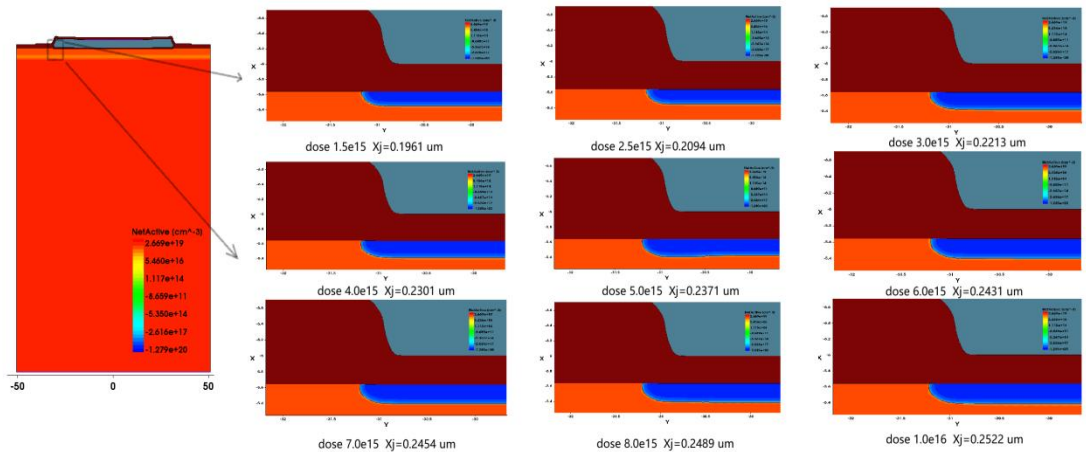


图 10 不同 BF_2^+ 注入剂量对结深的影响
表 2 TCAD 仿真结深统计表

	BF ₂ ⁺ 注入剂量（单位：1e15）								
条件	1.5	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	10.0
结深（μm）	0.1961	0.2094	0.2213	0.2301	0.2371	0.2431	0.2454	0.2489	0.2522

6结论

通过协同优化器件结构与工艺参数，成功研制出具有硬击穿低漏电性能的 5.1V 低压稳压二极管。设计了梯度掺杂 P+/N-/N+ 外延结构，结合 TCAD 仿真确定 $0.015\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 外延层掺杂浓度和三次光刻版工艺流程，实现雪崩-齐纳混合击穿模式的精准调控；开发 BF_2^+ 注入剂量-RTA 退火温度协同控制技术，实现缺陷工程控制，将 PN 结曲率半径控制在大于 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ ，反向漏电流降低至 $15\text{ }\mu\text{A}@4.2\text{V}$ 以内，使 V_{FT} 参数一致性提升至 $\pm 2.0\%$ ，动态电阻降低至 $5.0\text{ }\Omega$ 以内；将温度系数稳定在 $0.023\%/^\circ\text{C}$ 。

[参考文献]

[1]潘光燃,王焜,集成稳压二极管的器件结构和工艺研究,电子与封装,2013 第 13 卷第 7 期。
[2]朱正涌,半导体集成电路[M].北京:清华大学出版社,2001.35-37。
[3]马建华,低噪声硅(雪崩)稳压二极管的设计与试制[J].1992。
[4]孙汉炳,低压低动态低噪声硅(齐纳雪崩)稳压二极

管的设计与试制[J].1994。
[5]陈正才,彭时秋,林丽,黄龙.低压调整二极管击穿特性分析与优化设计[J].电子与封装,2021,21(3):030402。
[6]李家贵,黄灿灿.低压稳压二极管芯片制造工艺综述[J].科学技术创新,2018,(31):179-180。
[7]宋珂,吴德喜,高成勇.低压齐纳二极管的研制[J].山东工业大学学报,1996,(02):91-94。
[8]范坤泰.硅平面低压齐纳管的研究.山东工业大学学报,1987,17(1):82~89。
[9]宋南辛.晶体管原理.北京:国防工业出版社,1983.377。
[10]刘恩科.半导体物理学.北京:国防工业出版社,1992.173~197。
作者简介:寇春梅(Kou Chunmei)女,1980 年生,2002 年毕业于四川大学微电子学,2011 年取得北京大学软件工程硕士,在中国电子科技集团公司第五十八研究所工作,主要研究方向为微电子制造和分立器件技术。