

Gate Grounded NMOS 器件的 ESD 性能分析

朱科翰*

摘要:

本文基于某 $0.18\mu\text{m}$ -CMOS 工艺制程的 1.8V NMOS 器件，从工艺的角度并用 TLP 测试系统对栅极接地的 NMOS (GGNMOS) ESD 器件进行比较分析。介绍了 SAB 和 ESD 注入对 GGNMOS 的性能影响。影响 GGNMOS ESD 性能的瓶颈是均匀开启性。在 GGNMOS 版图等其它特征参数最优的前提下，采用 SAB 能改善其均匀开启性，从而大大改进 ESD 性能。GGNMOS 的瞬态触发电压在 7V 左右，不会造成栅氧可靠性威胁，采用 PESD 并非必需。

1. 引言

MOS 管作为 ESD 防护器件广泛被业界采用，代工厂给设计公司提供的 ESD 版图设计规则文档中一般只有 MOS 管的规范。随着工艺的进步，MOS 管的特征尺寸缩小了、特征频率的增高了，但是使得器件 ESD 的抵抗能力减弱了。由此工艺工程师为提高 ESD 性能，推出了 SAB/SB(Salicide Block)，ESD 注入 (ESD implant) 供客户选择，但不是免费的。GGNMOS 作为 ESD 器件正向依靠寄生 NPN (漏极的 N+有源区-P 型衬底-源极的 N+有源区) BJT 泄放 ESD 电流；反向由 PN 二极管 (P 型衬底-N+有源区) 和栅源相接的 NMOS 二极管组成。在全芯片 ESD 网络中，当 ESD 事件来临时，GGNMOS 正向和反向都有可能导通，这由潜在的 ESD 路径决定，ESD 电流总会流向低阻路径。所以在设计时必需考虑 GGNMOS 的正向和反向 ESD 性能以绝对保证芯片的可靠性。通常 GGNMOS 作为二极管 ESD 性能很强大，但必需结合电源钳位器件 (Power Clamp) 一起使用，比如电源对输入发生正 ESD 应力。GGNMOS 作为 BJT 是一种击穿型 (Breakdown Device) 的工作机理[1, 2]，依靠漏极与衬底之间的雪崩击穿触发后形成低阻通路泄放 ESD 电流。然而多指 GGNMOS 器件通常不能如愿以偿的均匀开启，即 ESD 性能并不与器件的面积成正比。GGNMOS 的均匀开启性早有研究[3]，ESD 研究人员也提出了不增加额外工艺的前提下，改进 GGNMOS 均匀开启性的方法，比如采用 N-Well 电阻[4]，多米勒结构[5]。第 2 节介绍了工艺对 GGNMOS 的 ESD 性能影响。第 3 节以试验数据的形式直观的比较了 SAB 和 PESD 对 GGNMOS 的 ESD 性能影响。第 4 节分析了 GGNMOS 的非均匀导通性。所有的试验数据都是基于 $0.18\mu\text{m}$ -CMOS 工艺的 0.18V NMOS 器件测试而得。

2. 工艺对 NMOS 管 ESD 性能影响

2.1. ESD 注入

ESD implant 可以选择掺杂类型，常用的元素有硼 (Boron) 和砷 (Arsenic) 或磷 (Phosphorus)。

硼为受主杂质 P+，砷和磷为施主杂质 N+。某些代工厂只提供掺硼元素的 ESD implant，所以又称为 PESD。ESD implant 最早采用掺硼以降低 MOS 管的触发电压[6]。但先进工艺中的 LDD (LDD 减小 MOS 漏极端在沟道下的电场强度分布，以克服因热载流子效应所造成的 I-V 特性因长时间使用产生漂移的问题) 会产生尖端放电，使得 ESD 常发生在此尖端。采用掺砷的 ESD implant 可消除 LDD 结构，但会使得有源区的结的横向扩散比较严重，故 ESD 器件不能采用太短的沟道长度[7]。[8]在某 0.18μm-CMOS 工艺制程下采用硼和砷的 ESD implant 不仅大大提高了 MOS 器件的正向 ESD 性能，而且对反向二极管特性也有所提高。

2.2. 金属硅化物隔离

在先进半导体工艺中，金属硅化物扩散能降低 MOS 器件源漏极端的串联扩散电阻，提高 MOS 器件的工作速度，使 MOS 器件适用于高频应用。但低方块电阻使得 ESD 电流很容易从 PAD 传到 MOS 管的 LDD 结构从而 ESD 性能下降。为了从工艺的角度改进金属硅化物对 MOS 管 ESD 防护器件的性能影响，从而 SAB 应运而生。金属硅化物隔离层可提高有源区的电阻从而提高压舱电阻 (Ballasting Resistor) 使得多指 NMOS 器件在 ESD 事件下均匀开启。

3. SAB 与 PESD 对 GGNMOS 的影响

图 1 和图 2 分别为普通的 GGNMOS 和带均匀 P-tap 的 GGNMOS 器件。通常没有 P-tap 的 GGNMOS 结构中，中间的漏极比两边的漏极距离 P 衬底的距离远，电阻大，从而中间的漏极会较先开启。P-tap 的作用是使多叉指 MOS 管的每个叉指的漏极到 P 衬底的距离相等，从而保证个漏极均匀开启。但是 P-tap 使得漏极距离 P 衬底的距离减小，电阻减小，需要更大的雪崩电流才能使 GGNMOS 回跳 (Snapback)，从而意味着触发电压 (Vt1) 会变大。所以 P-tap 不一定有助于 GGNMOS 的 ESD 性能。

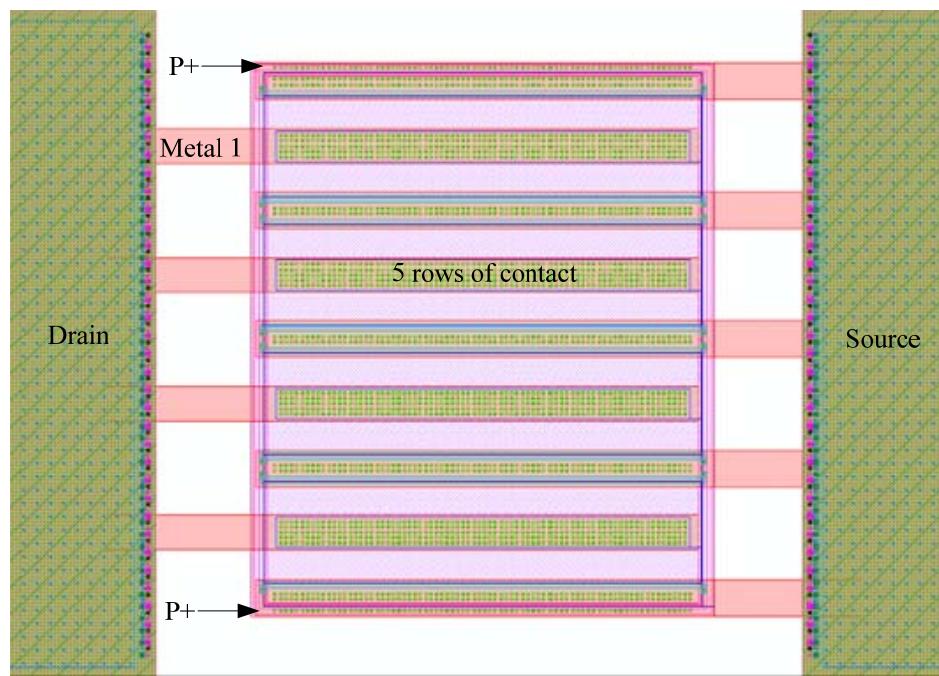


图 1. 8 叉指 GGNMOS 版图

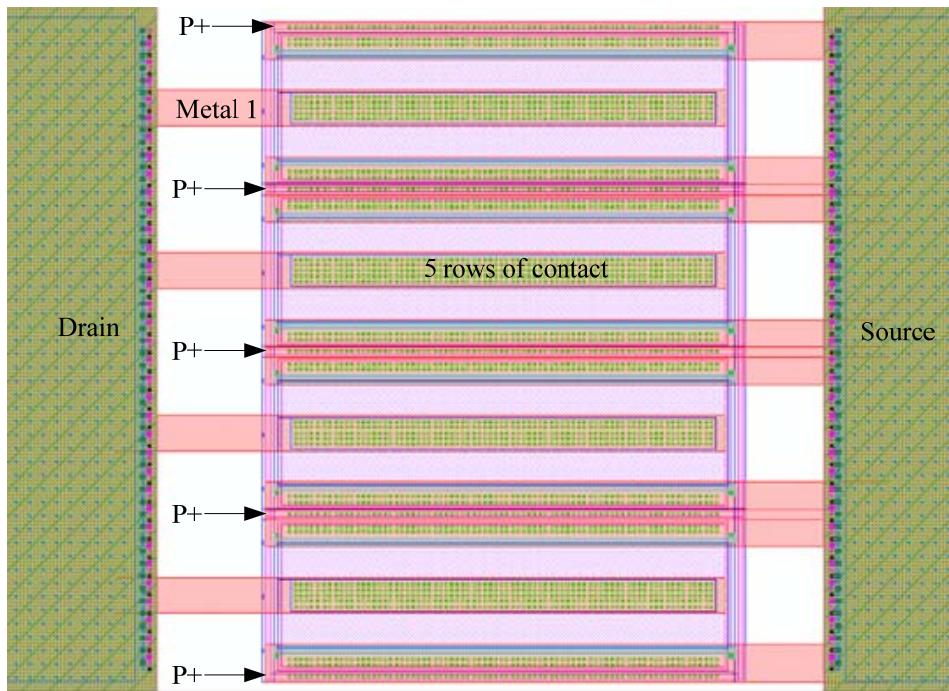


图 2. 带 P-tap 的 8 叉指 GGNMOS 版图

表 1 为 5 个不同 GGNMOS 器件的 TLP 测试结果。5 个器件的关键版图尺寸相同：有源区宽度 (W) =40μm, 叉指数 (Finger) =8, 漏极端接触孔的排数=5, 漏端总金属宽度=12.96μm (仅有金属 1)。不同之处为是否有 SAB, PESD 和 P-tap。

表 1. GGNMOS 的 TLP 测试结果

Device NO.	SAB	PESD	P-tap	Vt1/V	It1/mA	Vh/V	Ih/mA	Vt2/V	It2/A
185	N	N	N	6.55	2.36	4.78	60.6	9.95	2.32
186	Y	N	N	6.57	2.53	5.14	53.7	20.64	4.56
187	Y	Y	N	5.58	-0.326	5.16	30.3	20.27	4.55
189	N	N	Y	7.73	46.4	5.38	110	10.19	1.93
190	Y	Y	Y	7.25	74.6	6.17	118	19.79	4.52

Note:

Width=40μm, #Fingers=8, #Rows of contact@Drain=5, Total metal width@Drain=12.96μm(metal 1 only).

从表 1 可知：

- SAB 可大大提高 It2 (从 2.32A 到 4.56A)。
- PESD 能降低其 Vt1 (从 6.55V 到 5.58V)。
- P-tap 使 Vt1 增大 (从 6.55V 到 7.73V)、It2 减小 (从 2.32A 到 1.93A)。

原因分别是：

- SAB 使得漏极的方块电阻值增大，从而 ESD 电流更加均匀分布，泄放能力提高。
- PESD 注入受主杂质在漏极 N+有源区下形成 P+，降低雪崩击穿。
- P-tap 减小了寄生 BJT 的基区到发射区的电阻 (Rbe) 值，从而需要更大的电流达到 BE

结的导通电压。P-tap 也会增大保持电压 (V_h)，从而 $It2$ 减小，导致热击穿提前发生 (遵循能量守恒: $P=IV$)。

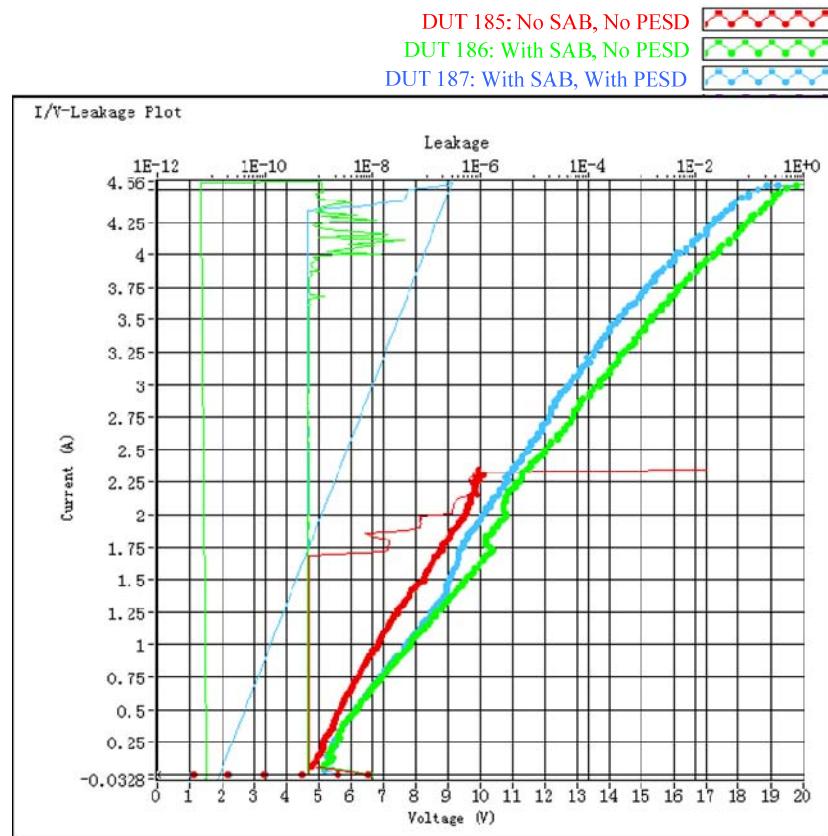


图 3 SAB 和 PESD 对 GGNMOS TLP I-V 曲线与漏电的影响

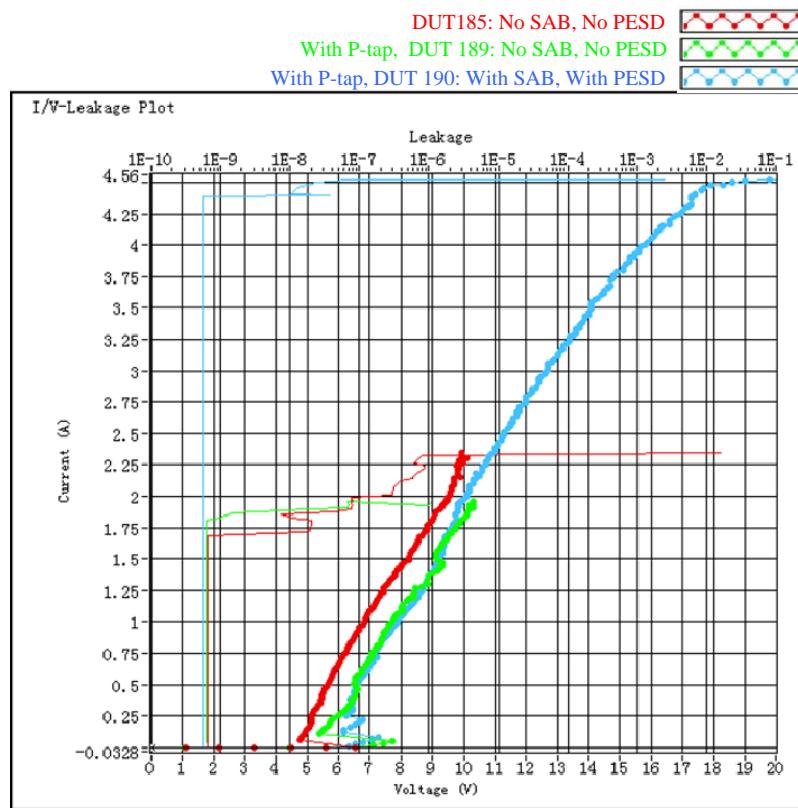


图 4. P-tap 和 SAB 与 PESD 对 GGNMOS TLP I-V 曲线与漏电的影响

图 3 和图 4 分别为 185 号、186 号、187 号 GGNMOS 和 185 号、189 号、190 号 GGNMOS 的 TLP I-V 曲线和漏电。

从图 3 和图 4 中的漏电可知：

- 常温下 GGNMOS 的漏电低于 1nA 。
- 186 号 (With SAB) 和 187 号 (With SAB&PESD) 器件是金属熔断失效。
- 其它器件都是热击穿失效。

进一步可以推断：

- Metal 1 能承受 ESD 电流的能力为 $0.35\text{A}/\mu\text{m}$ ($4.55\text{A}/12.96\mu\text{m}$)。
- 带 P-tap 的 GGNMOS 的 ESD 能力低于普通的 GGNMOS (虽然 190 号器件的 $\text{It2}=4.52\text{A}$ ，但它的失效是由热击穿造成)。

4. 多叉指 GGNMOS 非均匀性导通分析

图 5 和图 6 分别为 11 叉指和 6 叉指的 GGNMOS 器件的版图。NMOS 的 $W=30\mu\text{m}$ ，漏端只有一排接触孔。11 叉指 GGNMOS 漏端的金属宽度共为 $39.8\mu\text{m}$ ，6 叉指 GGNMOS 漏端的金属宽度共为 $14\mu\text{m}$ 。都采用了 SAB 层。

图 6 为 11 叉指、6 叉指和 2 叉指的 TLP I-V 曲线和漏电，测试结果很不理想。

由图 6 可知：

- 漏电偏大，特别是 6 叉指 GGNMOS 的漏电高达 $0.4\mu\text{A}$ 。
- 用了 SAB， It2 却很低，GGNMOS 显然没有均匀开启，造成提前失效。

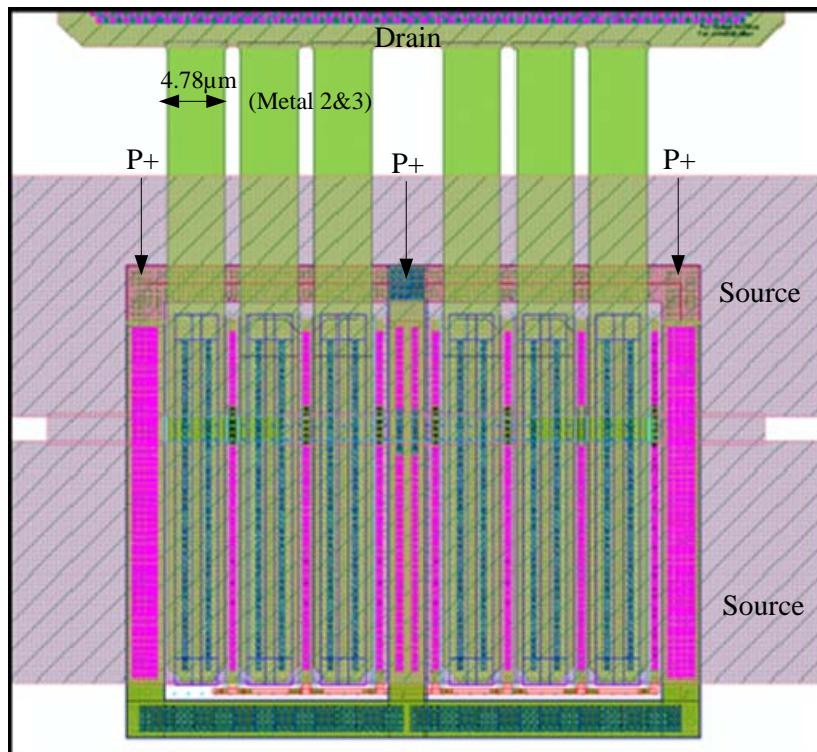


图 5. 11 叉指 GGNMOS 版图

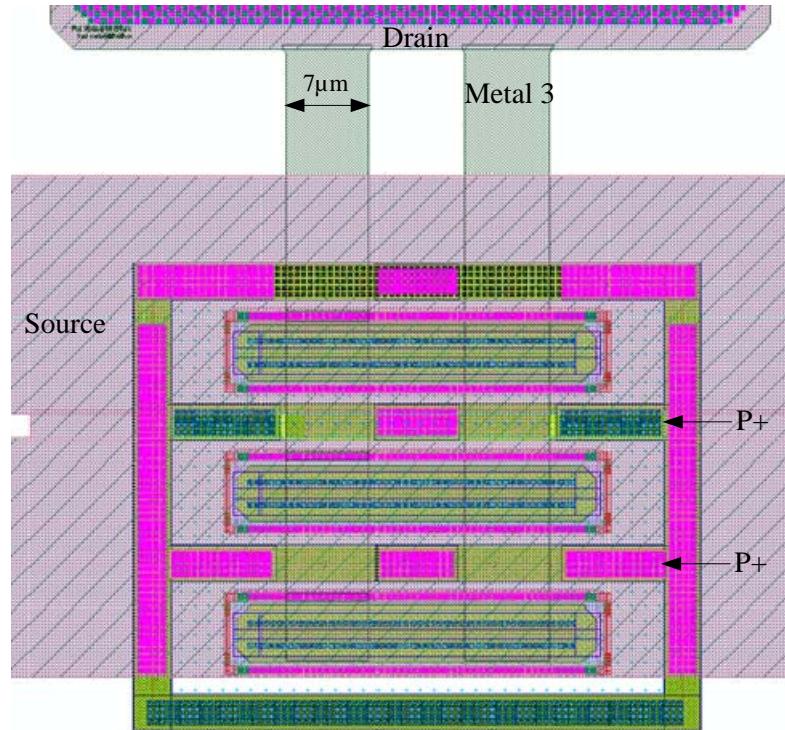


图 5. 6 叉指 GGNMOS 版图

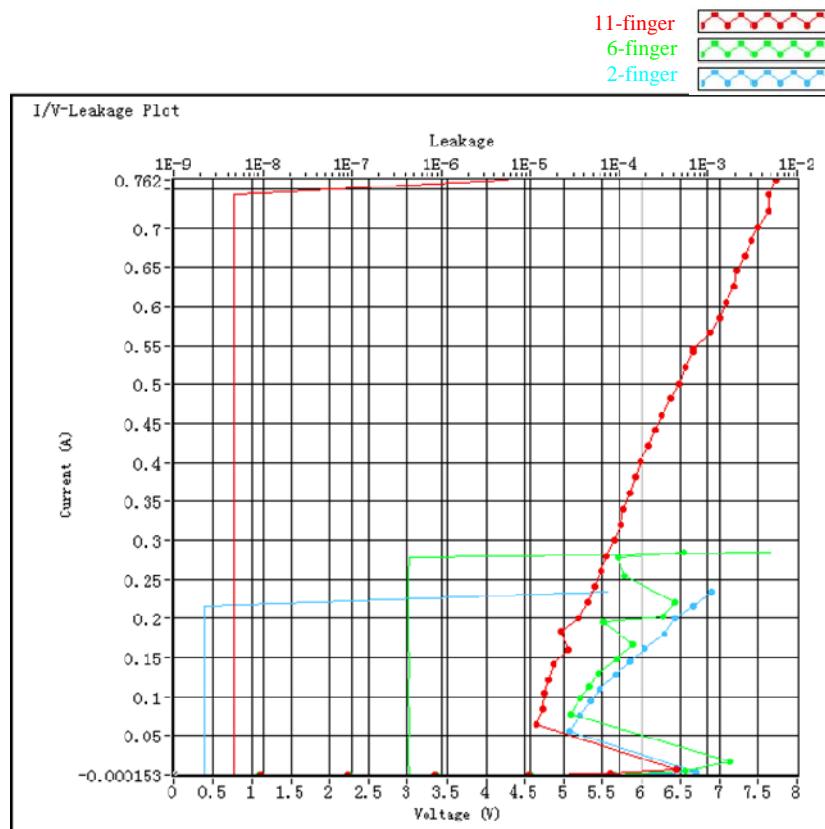


图 6. 不同叉指 GGNMOS 的 TLP I-V 曲线与漏电比较

本节中的测试器件的版图比第 3 节中测试器件的版图绘制得精细，但是其 ESD 性能让人大跌眼镜。GGNMOS 的 ESD 性能不与面积成正比，面积越大只会造成更加难以均匀开启。但

由于上面 GGNMOS 器件的漏端金属走线方法并不完全相同，所以没有绝对的可比性。

7. 总结

在 CMOS 工艺中，GGNMOS 是一种简单实用的 ESD 防护器件，但影响其 ESD 性能的瓶颈是均匀开启性。在 GGNMOS 版图等其它特征参数最优的前提下，采用 SAB 能改善其均匀开启性，从而大大改进 ESD 性能。0.18V NMOS 器件的栅氧直流击穿电压大约为 6V 左右，但瞬态击穿电压一般是 DC 击穿电压的两倍以上，GGNMOS 的 V_{t1} 在 7V 左右并不会造成栅氧可靠性威胁，所以采用 PESD 降低 V_{t1} 在成本上不合算，一般情况下也不需要。

8. 参考文献

1. Dabral, S. and T. Maloney, *Basic ESD and I/O Design*. 1998, Santa Clara, CA: John Wiley & Sons, Ltd.
2. Amerasekera, A. and C. Duvvury, *ESD in silicon integrated circuits – second edition*. 2002: John Wiley & Sons, Ltd.
3. Russ, C., et al. *Non-uniform triggering of gg-nMOS investigated by combined emission microscopy and transmission line pulsing*. *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings*, 1998.
4. Notermans, G. *On The Use Of N-well Resistors For Uniform Triggering Of ESD Protection Elements*. *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings*, 1997.
5. Trinh, S., et al. *Multi-finger turn-on circuits and design techniques for enhanced ESD performance and width scaling*. 2003. Bordeaux, France, France: Elsevier Ltd.
6. Hsue, C.-c. and J. Ko, *ESD Protection Improvement*. 1996, Hsinchu, TW: United States
7. Ker, M.D. *ESD (Electrostatic Discharge) Protection in CMOS Integrated Circuits*. Available from: <http://www.ics.ee.nctu.edu.tw/~mdker/ESD/index.html>.
8. Ming-Dou, K., C. Che-Hao, and L. Wen-Yu, *ESD implantations for on-chip ESD protection with layout consideration in 0.18um salicided CMOS technology*. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 2005. **18**(2): p. 328-337.