

SOI 高温器件及其在汽车电子等领域中的应用*

刘彦松 多新中 黄继颇 张 苗 王连卫 林成鲁

(中国科学院上海冶金研究所 信息功能材料国家重点实验室 上海 200055)

摘 要 石油钻井、航空航天、汽车等工业领域急需能在高温下工作的器件和电路。SOI(silicon-on-insulator)技术的高温器件和电路方面有着广泛的应用前景。文章简要介绍了 SOI 技术应用于制造高温器件和电路方面的进展情况。

关键词 SOI,高温器件和电路

SOI HIGH-TEMPERATURE DEVICES AND THEIR APPLICATIONS IN AUTOMOBILE ELECTRONICS

Liu Yansong Duo Xinzong Huang Jipo Zhang Miao Wang Lianwei Lin Chenglu

(State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai

Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract High-temperature devices and circuits are in urgent need in the well logging, aerospace and automotive industries. Silicon-on-insulator(SOI) technology holds great promise in the fabrication of high-temperature devices and circuits. Current developments in the application of SOI technology to this field are reviewed.

Key words SOI, high-temperature devices and circuits

1 引言

1998年8月3日,美国IBM公司在纽约East Fishkill宣布在世界上首次利用SOI技术成功地研制出了高速、低功耗、高可靠的微电子主流产品——微处理器等高性能芯片。IBM公司的这一举动震惊了国际微电子界,也使SOI技术成为众人瞩目的焦点。SOI因其独特的结构,具有体硅不可比拟的优势,可广泛应用于低压、低功耗器件与电路,高温器件与电路,高速电路,抗辐照电路的生产制造。本文将主要介绍SOI技术的高温器件、电路方面的应用情况以及进一步改善SOI高温器件、电路性能所面临

的问题。

2 高温电子的应用

石油钻井、航空航天、汽车等领域技术的发展,急需能在恶劣环境中,特别是能在高温下工作的器件和电路。如表1所示,不同的工业部门对温度的要求不尽相同,但它们普遍要求器件和电路能工作在200—300的高温环境中。由于常规的硅基集成电路不能在200以上的环境中工作,所以只能将在高温环境中的传感器的信号通过导线传输到远处的处理器或采用复

* 国家自然科学基金和国防军工重点预研资助项目
1998-10-23收到初稿,1998-12-28修回

杂的冷却系统,使设备上的处理器工作在适当的温度下.前者增加了导线长度和接头数量,导致了可靠性的下降和电磁干扰噪声的增加;而后者增加了系统的复杂程度、功耗和重量.两者都降低了系统的效率,增加了成本.高温电路则可以和传感器放在一起,甚至集成在同一基片上,工作在高温环境中,提高了测量的准确性、灵敏度和反应的速度,简化了系统的设计,提高了设备的性能.因此,高温器件和电路的研究受到越来越广泛的重视.

表 1 高温电子在工业部门中的应用

工业部门	温度范围/
1 汽车	
乘客舱	- 40 —85
引擎舱	- 40 —165
发动和传动	- 40 —165
2 石油和天然气	
油气井	75 —225
蒸汽灌注	200 —300
3 航空航天	
智能燃料系统	250
电子刹车系统	250
发动机控制/ 监测	300
4 其他	
军事	250
通信	250
重工业设备	300

3 体硅器件的限制

常见的体硅器件,由于高温时漏电流的增加、阈值电压的漂移、热激发门锁效应等原因,不能工作在 200 以上的高温环境中.

3.1 漏电流

漏电流的增加是电路在高温下失效的主要原因.晶体管的漏电流主要包括耗尽区中的产生电流(正比于 $n_i V$, V 是空间电荷区体积, n_i 是本征载流子浓度)和耗尽的漏极附近的扩散电流(正比于 $n_i^2 S$, S 是结面积).体硅器件的结面积和空间电荷区体积都非常大,因此,漏电流也非常大,见图 1.高温下载流子的迁移率变小,使晶体管导通时的电流变小;而同时漏电流使截止电流增加,这样使得器件在导通时和截

止时的电流差别变小.在超过 240 时,体硅器件导通,截止电流小到无法区分,致使体硅晶体管失效.

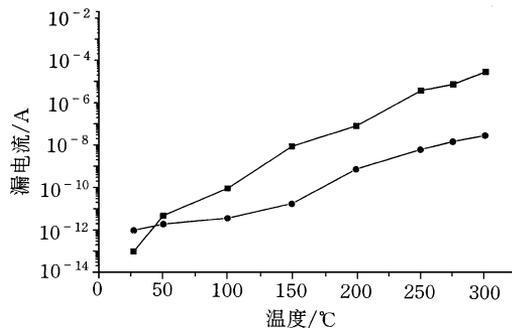


图 1 在体硅和 SOI N 沟晶体管中漏电流与温度的关系(相同尺寸条件下)
为体硅; 为 SOI

3.2 门锁效应

门锁效应是电路在高温下失效的另一个主要原因.体硅 CMOS 器件中的大多数寄生效应起源于器件和衬底之间的相互作用. CMOS 器件和 PNP 结构造成了寄生的晶闸管,晶闸管可以看作两个相互作用的晶体管,见图 2.当温度升高时,寄生的晶闸管导通,器件与衬底之间的漏电流增加,当晶闸管的增益大于 1 时,门锁效应就立即被触发.此时,漏电流急剧增加,电流产生的热量把体硅 CMOS 器件烧坏.为了消除门锁效应,体硅 CMOS 电路必须采用非常复杂的设计及工艺,增加了成本,降低了可靠性.

3.3 阈值电压

对于体硅器件,阈值电压 V_{th} 随温度 T 的变化关系^[1]为

$$\frac{dV_{th}}{dT} = \frac{d\phi_F}{dT} \left[1 + \frac{q}{C_{ox}} \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} N_a}{k T \ln(N_a/n_i)}} \right],$$

式中 ϕ_F 是费米能级, q 是电子电荷, C_{ox} 是栅氧化层电容, ϵ_{Si} 是硅的介电常数, N_a 是掺杂浓度, k 是玻尔兹曼常量, n_i 是硅本征载流子浓度.

当温度上升时,硅材料中的本征载流子浓度 n_i 增加,费米能级 ϕ_F 降低.同时,器件耗尽区的厚度减小,空间电荷区变窄,空间电荷变少.以上两种因素都将导致阈值电压下降.体硅器件的阈值电压随温度的变化是费米能级与空间电荷产生的阈值电压变化之和,因此变化比

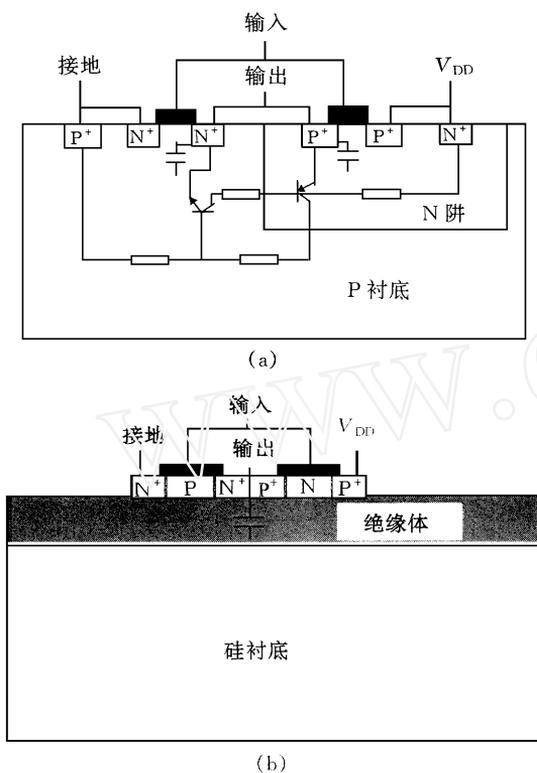


图 2

(a) CMOS 方向器剖面及门锁效应通道;
(b) SOI CMOS 反相器剖面

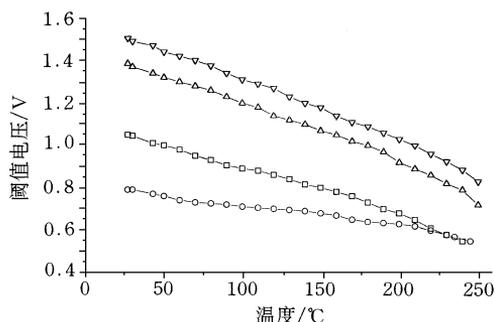


图 3 体硅、SOI 器件阈值电压与温度的关系
为体硅器件; 为全耗尽 SOI 器件;
和 ∇ 为厚膜 SOI 器件

较明显. 如图 3 所示.

4 SOI 器件的突破

由于它有 SiO_2 埋层 (见图 2), SOI 器件完全消除了高温激发的门锁效应, 并且高温时的漏电流特性、阈值电压特性等较之体硅器件有

很大的改善, 因而 SOI 器件可以胜任 300 以上的工作环境.

4.1 漏电流

SOI 器件中, 结面积和空间电荷区体积都比体硅器件的小得多, 因此, 在室温和高温下, 只能观察到很小的漏电流^[2]. 高温时, 扩散电流成分是主要的. 由于结面积小, 在相同尺寸条件下, SOI 器件的漏电流比体硅器件的低 3 个数量级 (见图 1). 图中, 室温下 SOI 器件的漏电流稍大是因为测试器件中的电子有效寿命相当低.

4.2 门锁效应

在 SOI CMOS 器件中, 由于 SiO_2 绝缘层的存在, 没有器件到衬底的电流通道 (见图 2), 门锁效应的通路被切断. 导致门锁效应的寄生 PNPN 结构包含重掺杂基区 (N^+ 和 P^+ 的源和漏), 重掺杂使双极晶体管的增益实际上减小到零, 因而不会触发门锁效应. 这样, SOI 电路不需复杂的设计和工艺就可彻底消除门锁效应^[3].

4.3 阈值电压

SOI 全耗尽器件的耗尽层宽度就是顶层 Si 膜的厚度, 它在一定温度以下是不变的, SOI 器件阈值电压随温度的变化只与费米能级有关, 即 $dV_{th}/dT = d\phi_F/dT$ ^[1], 因而对温度的敏感比体硅器件小 2—3 倍. 当超过一定温度后, SOI 全耗尽器件的顶层 Si 中也将产生中性区, 器件变成非耗尽的, 耗尽区的厚度也将随温度变化, 这时 SOI 器件随温度的变化与体硅器件相同. 但这个温度点在 200 以上, 对一般的高温应用影响不大, 如图 3 所示^[4,5].

此外, 高温时 SOI 器件在输出电导、频率特性、输出增益、电容特性等方面都较体硅器件有很大改善.

5 SOI 高温器件与电路的研制情况

由于高温器件和电路具有广阔的市场前景和巨大的社会、经济效益. SOI 高温器件和电路的研制越来越受到人们的重视, 并已取得了一些重大的研究成果.

5.1 SOI CMOS 运算放大器

运算放大器是一种常用的电子器件,如传感器得到的微弱信号需经放大器进行放大.为使体硅 CMOS 运算放大器能在高温下工作,必须采用特殊的和复杂的设计技巧,使每个晶体管的电流保持恒定,而不考虑流向衬底的漏电流.这种设计方法增加了器件的面积、功耗和复杂性,降低了运算放大器的动态响应特性. SOI CMOS 运算放大器也得益于器件内部的低漏电流,因为所有器件都工作在饱和状态,漏电流几乎可以忽略不计.其次,SOI CMOS 运算放大器在晶体管支路中是工作在固定的偏压下的,因而漏电流不影响偏压,功耗不随温度而变化.此外,传统的运算放大器的结构也不必因为工作在高温下而作任何改动.图 4 是一个二相折叠式共阴共栅 SOI CMOS 运算放大器的低频开环增益的温度关系图.从图中可看到,在室温到 300 的温度范围内,该运算放大器的开环增益保持在 80dB 左右,几乎不随温度而变化.

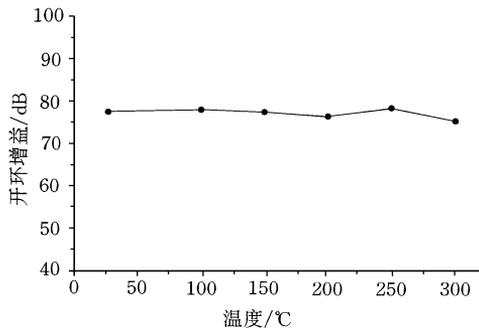


图 4 二相折叠式共阴共栅 SOI CMOS 运算放大器的低频开环增益与温度关系图

5.2 SOI 传感器

在汽车、石油钻井等领域中,传感器通常要工作在 300 的高温环境中.运用 SOI 技术研制传感器非常具有应用前景.这是因为 SOI 的高温特性使 SOI 传感器能在高温环境中工作,更为重要的是 SOI 高温传感器可以和 SOI 高温电路集成在同一基片上,从而简化了测量系统的设计,减小了系统的体积,提高了系统的精确度、灵敏度和反应速度.

美国 Honeywell 固体电子中心研制了一种中等精度的高温高压传感器.该传感器包括运

算放大器和精确电阻,偏置和反馈电阻以及运算放大器集成在同一基片上,并进行高温封装.

Mike Myung Ok - Lee 等人正在运用微腔技术研制带有微处理器的小尺寸 SOI 传感器^[6],该传感器可广泛应用于汽车发动机控制、气流表控制等领域.

5.3 SOI SRAM

CMOS SIMOX SRAM 不需经过特殊的设计或处理就能工作在高温环境中,例如 16K SRAM 在 400 温度下仍能正常工作.研究还表明,SOI SRAM 在 400 工作后,如果让它在室温下工作,其性能没有显著的变化.虽然温度的升高使电导下降,从而增加了 SRAM 的存取时间,但它的速度并不因电导减小而下降,这是因为阈值电压的下降提高了电路的速度.除了 16K SOI SRAM 外,256K、1M SOI SRAM 都已研制成功^[7,8].

5.4 SOI A/D 转换器

德国 IMS 公司开发了 2 μ m CMOS 工艺过程用于制造 A/D 转换器,其 A/D 转换器可工作在 250 高温下(采用钨电极,最高温度可达 300)^[9].如果把 SOI A/D 转换器和 SOI 传感器等其他器件、电路集成在同一基片上,则不仅可以直接得到数字信号,而且极大地减小了器件的体积.

5.5 其他

其他的 SOI 高温器件和电路有:美国 Honeywell 固体电子中心研制的模拟开关,最高可工作在 300 的高温下;在 320 环境下工作的 SIMOX CMOS 反相器^[10];在 500 环境下工作的环型振荡器^[11];在 275 环境下工作的电压参考电路^[12]等.

6 SOI 高温器件和电路有待解决的问题

由于漏电流等多种原因,体硅器件不能在高温下工作,以前的研究主要集中在减小高温工作时器件的漏电流.而现在 SOI 器件解决了漏电流的问题,使工作温度达到了 300 ,然而,尚有许多新的问题有待于解决.

6.1 SiO₂ 埋层和 Si - SiO₂ 界面

目前最常用的 SOI 技术有两种——SIMOX (separation by implanted oxygen) 和 Unibond SOI. 它们都是以 SiO₂ 作为绝缘层. 现在的 MOS 器件的沟道长度已经进入亚微米级, 沟道中的电场强度大于 $1 \times 10^6 \text{V/m}$, 很容易产生热载流子, 注入到 SiO₂ 层中, 并在其中造成过剩电荷, 导致阈值电压的漂移, 同时也造成 SiO₂ 层结构的损坏, 产生界面态, 加剧了对载流子的散射, 降低了迁移率, 甚至会导致 SiO₂ 层被击穿^[13]. 高温下热载流子注入效应对 SiO₂ 层的作用是怎样的? 对器件的寿命有什么影响? 这些问题还有待于进一步研究. 此外, 寻求更好的材料代替 SiO₂ 作为绝缘层也是一项有趣的课题.

6.2 电极材料

铝是常规器件中最常用的电极材料, 但铝的熔点低, 因此在高温下易形成硅铝互溶体和产生电迁移的现象, 使得铝电极在高温器件中不再适用. 在 $T = 150^\circ\text{C}$, $j = 1 \times 10^6 \text{A/cm}^2$ 的情况下, 硅器件的铝电极的寿命只有 156h. 钼、钨等高熔点金属得益于它们的难熔性质, 将成为高温器件电极的合适材料. 其中钨的特性更好, 钨与 SiO₂ 的粘性好, 而且钨与硅的热膨胀系数相似 ($\alpha_{\text{W}} = 3.6 \times 10^{-6} \text{m/m}^\circ\text{C}$, $\alpha_{\text{Si}} = 4.6 \times 10^{-6} \text{m/m}^\circ\text{C}$, $\alpha_{\text{Al}} = 23.6 \times 10^{-6} \text{m/m}^\circ\text{C}$), 钨的肖特基势垒也低, 价格也相对便宜. 钨电极的制造工艺还不成熟, 尚需要做很多工作.

6.3 可靠性问题

SOI 功率器件因短路等误操作而引起的自热效应是它在高温下工作时所面临的一个严重问题. 对这一问题的研究表明, 在瞬时高功率情况下, 基片最高上升温度与顶层硅膜的热容和氧化埋层的热阻有密切的关系, 而这二者都决定于 SOI 结构中各自的厚度. 自热效应很容易破坏器件, 因此, 进行器件设计时必须尽量减小自热效应.

除了与自热效应直接有关的可靠性问题外, 器件在使用时由于温度的变化而产生的机

械应力也会导致其性能的降低. SOI 器件具有典型的三明治结构, 包含许多热胀系数不同的薄层, 因此, 器件温度改变引起的热应力将导致重复机械应力, 从而破坏界面处的电接触, 甚至导致脱层. 这反过来增加了散热片的热阻, 提高了器件的温度, 并最终破坏器件.

参 考 文 献

- [1] 考林基 J P 著, 武国英等译. SOI 技术——21 世纪的硅集成电路技术. 北京: 科学出版社, 1993. 169—170
- [2] Krull W A, Lee J C. Demonstration of the Benefits of SOI for High Temperature Operation. In: Proceedings IEEE SOS/ SOI Technology Workshop. Georgia: 1988. 69—70
- [3] Groeseneken G, Colinge J P, Maes H E *et al.*. IEEE Electron Device Letters, 1990, 11(8): 329—331
- [4] Seo J H, Woo J C, Mendicino M *et al.* J. Electrochem. Soc., 1997, 144(1): 375—378
- [5] 竺士炆, 林成鲁, 高剑侠等. 固体电子学研究进展, 1996, 16(4): 348—351
- [6] Lee M M O, Moon Y H. A High Density Circular - shape SOI iMEMS with Intelligent Pressure Sensor. In: Sponsored by the IEEE Electron Society. IEEE International SOI Conference Proceedings. California: 1997. 56—57
- [7] Gotou H, Sekiyama A, Seki T *et al.* A 256 KBIT SOI - FULL - CMOS - SRAM. In: Sponsored by Electron Devices Society of IEEE. IEDM Technical Digest. Washington D. C.: 1989. 912—913
- [8] Fechner P S, Dougal G D, Sullwold J G *et al.* Radiation Hardened SOI CMOS and 1M SRAM. In: Sponsored by the IEEE Electron Society. IEEE International SOI Conference Proceedings. California: 1997. 172—173
- [9] Dance B. Semiconductor International, 1994, 17(13): 83—90
- [10] Francis P, Terao A, Gentinne B *et al.* SOI Technology for High - Temperature Applications. In: Sponsored by Electron Devices Society of IEEE. IEDM Technical Digest. San Francisco: 1992. 353—356
- [11] Maszara W P. Proc. of the 4th International Symposium on Silicon - on - insulator Technology and Devices, ed. by Schmidt D, the Electrochemical Society, 1990. 96(6): 199
- [12] Eisenhut C, Klein J W. SIMOX Voltage References for Applications up to 275°C Using the Threshold Voltage Difference Principle. In: Sponsored by the IEEE Electron Society. IEEE International SOI Conference Proceedings. California: 1997. 110—111
- [13] Jeon D SU, Burk D E. IEEE Transactions on Electron Devices, 1989, 36(8): 1456—1463