

SIMOX 硅片埋氧层垂直方向热导率的测量*

何 平¹ 刘理天¹ 田立林¹ 李志坚¹ 董业明² 陈 猛² 王 曦²

(1 清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

(2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 离子束重点实验室, 上海 200050)

摘要: 提出了一种简单、有效而且准确的测量 SOI 硅片埋氧层垂直方向热导率的方法, 并采用这种方法测量了用 SIMOX 工艺制作的 SOI 硅片的埋氧层垂直方向的热导率. 测量结果显示至少在 55nm 以上的尺度上对于 SIMOX 硅片的埋氧层垂直方向经典的热导率定义仍然成立, 且为一明显小于普通二氧化硅的热导率 (1.4W/mK) 的常数 1.06W/mK. 测量中发现硅/二氧化硅边界存在边界热阻, 并测量了该数值. 结果表明, 边界热阻在 SOI 器件尤其是薄二氧化硅背栅的双栅器件热阻的计算中不可忽略.

关键词: SOI; SIMOX; 热导率; 边界热阻

EEACC: 2530F; 7320R

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)10-1063-04

1 引言

SOI 器件的自热效应是 SOI 器件应用中存在的一个严重的问题. 随着器件尺寸的减小, 芯片上的功率密度会不断增加. 然而 SOI 器件埋氧层的热导率很低, 使得 SOI 器件的散热变得很困难, 导致器件工作的温度过高, 降低了器件的性能和可靠性. 为了准确估计自热效应的大小, 必须得到埋氧层热导率的准确数值. 研究表明^[1], 不同工艺得到的氧化层的热导率差别很大.

随着工艺的发展, 低能量和低剂量注入的 SIMOX 硅片得到广泛的应用^[2,3]. 然而, 有关这种埋氧的热导率的数据很少. Goodson 等人^[2]曾经测量过 SIMOX 工艺制作的埋氧的热导率. 不过他们使用的方法比较复杂, 而且不适合薄的氧化层^[2]. Tenbroek 等人^[1]采用一系列不同宽度的四端电阻测量了 SOI 硅片埋氧的热导率. 他们的方法比较复杂, 而且需要假设电阻有很好的线性, 即在很小电流(功率可以忽略)和大电流的情况下电阻的温度特性相同. 这可能引入很大的误差且对于很多薄膜电阻并不适用, 而且他们测量的 SOI 硅片的埋氧层很厚. 对于薄的埋

氧层, 垂直方向热导率的数值不仅对于器件的热设计十分关键, 同时对于验证超薄绝缘层的热导率是否存在小尺寸效应有着理论上的意义. 对于这一尺度的埋氧层, 边界热阻起着比较大的作用. 实验结果^[4]显示, 这一数值也和工艺有关. 目前对于这一热阻还没有具体的测量数据. 因而无法估算它对器件热阻的影响. 为了精确测量薄埋氧层垂直方向的热导率, 我们提出了一种改进的测量方法. 这种方法简单有效, 而且准确. 使用这种方法, 我们测量了从 55nm 到 160nm 不同厚度的 SIMOX 埋氧层的单位面积热阻, 并提取出了 SIMOX 埋氧的热导率和边界热阻.

2 测试结构及方法

与 Tenbroek 等人^[1]的方法相同, 我们采用 CMOS 工艺在 SOI 硅片(厚度 525 μm)的顶层硅薄膜(厚度 100~200nm)上制作了一系列不同宽度的四端电阻, 如图 1 所示. 其中 L 为 50 μm , W 的范围从 3 μm 到 20 μm . 在 A、D 两端之间加上电流, 测量 B 和 C 之间的电压差, 因此 B 和 C 之间的区域为电阻的有效区域. 该电阻同时用于加热和测温. 通过三维的热传导

* 国家自然科学基金(批准号: 5995550-1)和国家重点基础研究专项经费(编号: G2000036501)资助项目

2002-11-15 收到, 2002-12-26 定稿

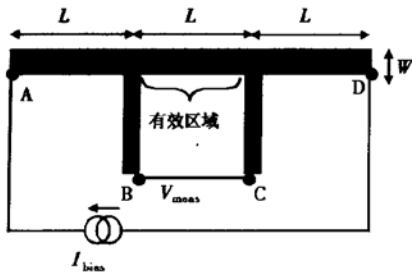


图 1 四端电阻示意图

Fig. 1 Layout of four terminal resistor

模拟^[1]可知, 在 A 和 D 之间加上电流发热时, 有效区域内的温度差异很小, 所以可以认为是常数. 在 A、D 两端之间加上一个较大的电流 I_B , 然后使用 HP4145 半导体特性测量仪测量 B、C 两端之间的电压差 V_M , 从而可以计算出有效区域内消耗的功率 P_M 和有效区域的电阻值 R_{cl} . 首先, 使用一个可以调节温度的底座将硅片衬底的温度固定在 T_{amb1} , 测量出电阻 R_{cl} 随功率 P_M 变化的特性, 然后使用底座温度调节功能将硅片衬底温度固定在 T_{amb2} , 再次测量电阻 R_{cl} 随功率 P_M 变化的特性. 将两次的测量结果画在一张图上, 如图 2 所示. 假设在温度相同的情况下 R_{cl} 相同, 则可以得到电阻有效区域的总热阻为

$$R_{th, tot} = - \frac{\Delta T_{ambi}}{\Delta P} \quad (1)$$

与 Tenbroek 等人^[1]的方法相比, 我们的方法简单却很有效, 将会减少引入不必要的误差. 不需要假设在很大的偏置电流变化和温度范围内电阻是常数, 也不需要电阻进行复杂的校正. 惟一的假设是在很小的电流变化范围内, 相同温度下电阻的电阻值不变, 因此测量的结果具有较好的准确性.

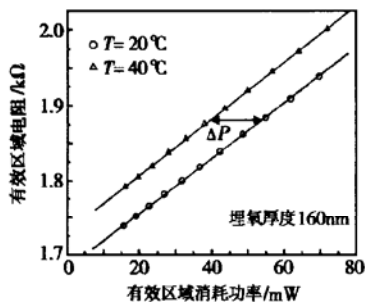


图 2 不同底座温度下电阻随功率的变化

Fig. 2 Resistance of the active region versus power dissipation

实际上, 该热阻值为有效区域到恒温底座之间

的热阻, 包括了横向扩散和衬底热阻的影响. 其中由于衬底厚度 t_{sub} 比较大, 虽然单晶硅的热导率较大, 其热阻还是比较大的. 三维有限元分析表明, 该热阻占总热阻的 20% ~ 30%, 因此必须将这部分热阻考虑在内. 研究表明, 对于这种长的 L 和窄的 W 的情况, 其衬底热阻可以用以下公式近似^[1]:

$$R_{th, sub} = \frac{a}{\kappa_{Si} \pi L} \ln(4L/W) \quad (2)$$

其中 a 为拟合参数; κ_{Si} 为单晶硅的热导率, 在 $LW \ll t_{sub}^2$ 的条件下, 该数值在很大的 L 、 W 范围内为一常数 (1.04). 图 3 所示为该公式和三维有限元分析结果的比较, 可以看到, 该公式在实验所用的尺度范围内具有很好的准确性.

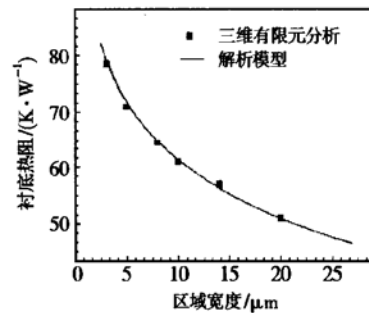


图 3 衬底热阻模型和三维有限元分析结果的比较 硅衬底厚度为 525 μm.

Fig. 3 Comparison between analytical model result and three-dimension finite element simulation result
The thickness of the substrate is 525 μm.

图 4 为测试结构截面热传导示意图. 忽略埋氧中横向的热传导 (在 $W \gg t_{ox}$ 的情况下成立) 以及衬底和加热底座之间的热阻, 考虑衬底的热导和电阻两侧的热导之后, 电阻有效区域到底座之间的热导为^[1]:

$$G_{tot} = G_0 + \left[\frac{aW \ln \frac{4L}{W}}{\kappa_{Si} \pi} + \frac{t_{ox}}{\kappa_{ox, eff}} \right]^{-1} WL \quad (3)$$

其中 G_0 代表了从电阻两侧以及测量管脚传导的热导, 该数值与电阻的宽度无关; t_{ox} 为埋氧层的厚度; $\kappa_{ox, eff}$ 为埋氧的有效热导率 (包括了边界热阻); W 和 L 为有效区域的宽度和长度. 为了测量 G_0 以及 $\kappa_{ox, eff}$, 我们测量了一系列不同宽度 W 的热阻的热导 $G_{tot}(W)$, 如图 4 所示. 根据这些数据和公式 (3), 将 G_0 和 $\kappa_{ox, eff}$ 作为拟合参数, 通过非线性拟合的方法可以得到了 G_0 以 $\kappa_{ox, eff}$ 及的数值, 非线性拟合的结果如图 5 所示.

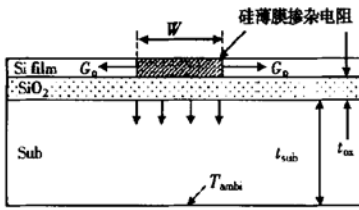


图 4 测试结构截面热传导示意图

Fig. 4 Illustration of heat transfer from the resistor

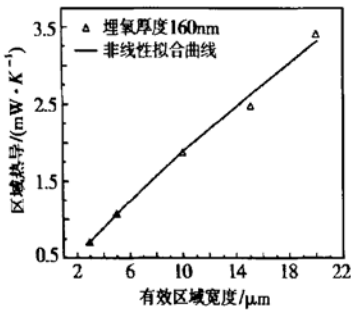


图 5 测量所得的有效区域总热导随电阻宽度的变化以及非线性拟合的结果

Fig. 5 Measured total thermal conductance of the active region with different width of the active region and the non-linear curve fitting result

3 测试结果及讨论

我们测量了五种埋氧厚度分别为 55 .70 .83 .90 .160nm 的 SIMOX 埋氧层的单位面积热阻 $R_{th,ox} = t_{ox} / \kappa_{ox,eff}$, 结果如图 6 所示. Tenbroek 等人^[1]的结果也标在图上.

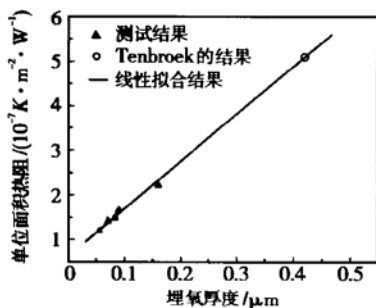


图 6 测量所得埋氧单位面积热阻随厚度的变化 埋氧厚度为 55 .70 .83 .90 .160nm.

Fig. 6 Measured thermal resistance per unit area of the buried oxide with different oxide thickness The measured oxide thickness are 160, 90, 83, 70, and 55nm.

设埋氧单位面积热阻

$$R_{th,ox} = R_{th,bond} + t_{ox} / \kappa_{ox,real} \quad (4)$$

其中 $R_{th,bond}$ 为 Si/SiO₂ 界面的单位面积边界热阻. 根据公式(5) 和图 4 中的数据, 将 $R_{th,bond}$ 和 $\kappa_{ox,real}$ 作为拟合参数通过线性拟合可以得到 $R_{th,bond}$ 和 $\kappa_{ox,real}$ 的数值分别为 $6.3 \times 10^{-8} K/W$ 和 $1.06 W/mK$. 从图 4 可以看到测量数据的线性度很好. 所得到的 SIMOX 埋氧热导率数值明显低于一般的二氧化硅的热导率, 且边界热阻的数值相当于厚度为 59nm 的 SIMOX 埋氧. 对于用 BONDING 工艺生产的 SOI 硅片, 边界热阻更大^[1].

4 结论

本文提出了一种准确地测量 SOI 硅片埋氧层垂直方向热导率的方法. 由于该方法简单(无需对电阻的电阻-温度曲线进行校正), 有效(适用很大的温度和功率范围), 因而可以运用到很多相似的薄膜电阻的情况下. 采用这种方法我们测量了一批用 SIMOX 工艺制作的 SOI 硅片的薄埋氧层(厚度最小到 55nm) 垂直方向的热导率. 测量结果显示 SIMOX 硅片的埋氧层垂直方向的热导率至少到 55nm 的情况下未发现尺寸效应. 该热导率明显小于普通二氧化硅的热导率. 测量中发现硅/二氧化硅边界热阻的存在并测量了该数值. 结果表明, 边界热阻在 SOI 器件热阻的计算中不可忽略, 尤其对于较薄的埋氧层, 单位面积边界热阻大致相当于 59nm 的埋氧层的单位面积热阻.

参考文献

[1] Tenbroek B M, Bunyan R T, Whiting G, et al. Measurement of buried oxide thermal conductivity for accurate electrothermal simulation of SOI devices. IEEE Trans Electron Devices, 1999, 46: 251
 [2] Anc M J, Farley M, Jiao J, et al. High quality low-dose low-energy SIMOX implanted in high current oxygen implanter. IEEE Int SOI Conf Proc, 1998: 41
 [3] Chen Meng, Chen Jing, Zheng Wang, et al. Research of low dose SIMOX wafer. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22: 1019 (in Chinese) [陈猛, 陈静, 郑望, 等. 低剂量 SIMOX 圆片研究. 半导体学报, 2001, 22: 1019]
 [4] Goodson K E, Flik M I, Su L T, et al. Annealing-temperature dependence of the thermal conductivity of LPCVD silicon-dioxide layers. IEEE Electron Device Lett, 1993, 14: 490

Measurement of Thermal Conductivity of Buried Oxides of SOI by SIMOX*

He Ping¹, Liu Litian¹, Tian Lilin¹, Li Zhijian¹, Dong Yeming², Chen Meng² and Wang Xi²

(1 Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Ion Beam Laboratory, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: A new simple and effective method to measure the thermal conductivity of the buried oxides of the SOI wafer is proposed. By using this method, the thermal conductivity of the buried oxides of the SOI wafer fabricated by SIMOX technology with different thickness is measured. It is found that the thermal conductivity of the SIMOX oxide is 1.06W/mK compared to the 1.4W/mK, which is normally used. The boundary thermal resistance for SIMOX technology is measured for the first time. The results show that the boundary resistance cannot be neglected in the calculation of thermal resistance for SOI devices.

Key words: SOI; SIMOX; thermal conductivity; boundary thermal resistance

EEACC: 2530F; 7320R

Article ID: 0253-4177(2003)10-1063-04

* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 59995550-1), Special Funds of National Key Basic Research Plan of China (No. G2000036501)