

斜角造型高压硅器件表面特性的光感生电流法检测

董小兵, 张少云, 徐传骧

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用激光探针表面电荷测量系统, 实现了有机/无机介质膜保护下的高压硅器件表面耗尽区展宽的测量, 分析了光感生电流(OBIC)曲线与硅表面少数子扩散长度、表面复合速率以及波长相关吸收系数的关系. 实验和计算结果表明, He-Ne 激光束由于具有较大的吸收系数($> 3\ 200\ \text{cm}^{-1}$)和适当的透射深度($3.1\ \mu\text{m}$), 对曲线上下沿变化影响很小, 测量结果可以直接反映硅表面本身的响应. 小正斜角造型大功率硅整流管在反向偏置下, 表面耗尽区在稳态光电导下的扩展几乎都是在低掺杂的 n 区进行, p 区的扩展被“钉扎”. 表面保护不良时, OBIC 曲线可直接反映出局部的电场倍增状态. 对不同腐蚀时间处理的磨角造型硅表面, OBIC 测量结果表明, 当腐蚀时间短时, 表面少数子寿命较低; 反之, 则寿命会有所提高.

关键词: 硅器件; 表面耗尽区; 光感生电流

中图分类号: TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)06 - 0623 - 04

Surface Characteristics of Bevel-Shaped High Voltage Silicon Devices Detected by Optical Beam Induced Current Method

Dong Xiaobing, Zhang Shaoyun, Xu Chuanxiang

(School of Electrical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: By utilizing laser beam surface charge measurement system, the width and extension of the power device surface depletion region which is passivated by organic or inorganic materials can be quickly measured, and the relationships of optical beam induced current (OBIC) curve with minority carrier diffusion length, surface recombination velocity and light absorption coefficient are theoretically analyzed. He-Ne laser beam has greater absorption coefficient ($> 3\ 200\ \text{cm}^{-1}$) and proper penetration depth ($3.1\ \mu\text{m}$), which facilitates obviously lowering the influence on the edges of OBIC curve, so the results can reflect the actual property of silicon device surface. For small positive angle bevelled power diode under reverse biased voltage, the surface depletion region extension is almost in the low doped n region, the extension in p region seems to be pinched. Field multiplication can also be observed if the surface is improperly protected. And OBIC can directly exhibit the influence of different erosion time on the surface minority carrier lifetime—the shorter erosion time, the lower surface minority carrier lifetime.

Key words: silicon device; surface depletion region; optical beam induced current

为获得耐压特性优良的硅器件, 必须研究硅半导体表面和界面的特性对器件的耐压和长期稳定性的影响. 通常用于器件钝化表面特性研究的电子束感生电流法(EBIC)^[1]由于受到试验条件的影响(要求一定的真空度、试样外加反向电压不能超过 2 kV

以避免影响电子束聚焦、试样的钝化表面材料限制), 不能广泛地应用于有机材料保护下的高压半导体器件检测中. 光感生电流法(OBIC)采用稳定性较好的单色光作探针, 在半导体表面下一定区域内形成少数载流子的注入. 由于所产生的光生载流子在

收稿日期: 2003 - 11 - 02. 作者简介: 董小兵(1973~), 男, 博士生; 徐传骧(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家“211 工程”建设自制设备资助项目(201101004C).

结表面不同区域的扩散复合作用不同,通过检测外电路电流变化,即可反映表面处的耗尽区展宽和硅半导体表面、界面特性,如表面复合速率、少子寿命等^[2,3].当满足下面条件时,光激发产生的载流子能以 OBIC 电流的方式检测出来该区域存在电场外部电路闭合.

根据不同波长的光在硅中的透射深度不同,OBIC 也可采用不同波长的光来研究不同结构硅功率器件的电场优化状态,以避免器件存在局部电场集中而导致的耐压问题^[4,5].同时,通过测量斜角造型反偏 p-n 结表面耗尽区的宽度,并采用数值计算模拟表面耗尽区宽度与界面电荷密度的关系,可实现界面电荷的测量^[6].OBIC 法可适用于不同的环境条件和温度,能够适应硅表面不同的钝化条件,包括透明有机介质膜和无机介质膜,并允许器件在施加较高反向电场下进行测量以获得器件耐压特性变化的信息.图 1 给出了 OBIC 法测试装置图.

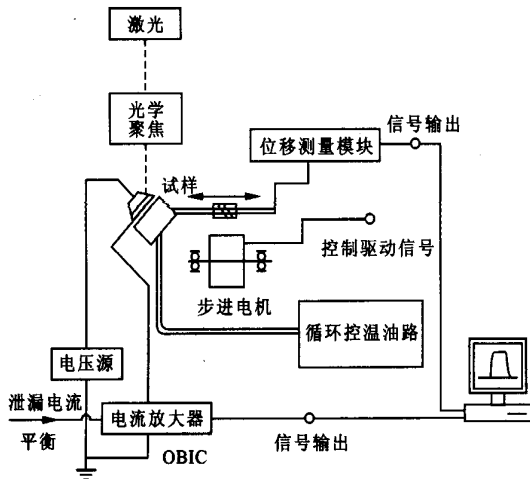


图 1 激光探针半导体表面耗尽区宽度测量装置

1 OBIC 法测量原理

1.1 OBIC 测试模型

通常对于 n^+np^+ 结构的整流管,对结表面的激光束扫描反映出的外电路电流变化,可以描述为在不同外加反向偏压下的耗尽区展宽.为获得电子-空穴对,用于测量的单色光波长应满足 hc/E_g ,其中 E_g 为硅的禁带宽度.对于本文所采用的 He-Ne 红色激光束,波长为 632.8 nm,硅中的透射深度小于 $3.1 \mu\text{m}$.

对于我们所研究的单结或多结试样,只考虑光垂直扫描过结时的情况,图 2 给出了计算过程中的坐标系统.试样在 y 和 z 方向上被看作是半无限的, x 为扩散成结的方向.在垂直于 p-n 结平面(x 方

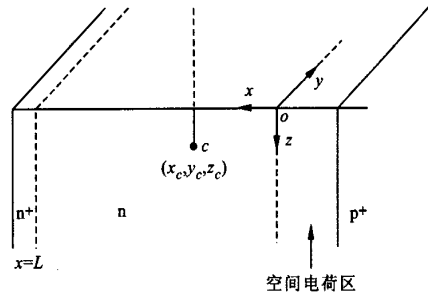


图 2 计算中采用的试样形状和坐标系统

向)试样的边界位于 $x=L$,这个边界可以是一个紧邻低掺杂 n 区的 n^+ 层,如在 p^+nn^+ 整流管结构中一样.少数载流子被限制在 n 型区域,聚焦的光束扫过 n 型区域朝 p^+-n 结移动.下面,对 n 型区域求解过剩载流子 p 的连续性方程.

对于小浓度 p ,连续性方程可以写成^[2]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \nabla^2 (p) - \frac{p}{\tau} + g \quad (1)$$

式中: D 为扩散常数; τ 是体寿命; g 是过剩空穴的产生速率.对于 n^+pp^+ 型整流管,过剩电子具有相似的方程.

1.2 持续光照产生的稳态源

当过剩载流子是由一聚焦光束产生时,需要考虑与波长相关的光穿透深度.试样处的光强度为 $I(x, y, z) = I_0(1 - R)\exp(-kz) \delta(x - x_c, y - y_c)$ (2)

式中: I_0 是试样表面处的光强; R 为试样的反射率; k 是与波长相关的吸收常数.在距表面一定距离 z 处的产生率 $g(x, y, z)$ 被假定与在 z 处吸收的光强成正比,即

$$g(x, y, z) dz = -g_0 \frac{dI(x, y, z)}{dz} dz = g_0 I_0(1 - R) k \exp(-kz) dz \delta(x - x_c, y - y_c) = G_0 k \exp(-kz) dz \delta(x - x_c, y - y_c) \quad (3)$$

这里忽略了光点在试样表面 x 和 y 方向上的大小.当使用长焦距物镜并结合精细调焦时,这个忽略可以被满足(直径 \ll 扩散长度).在稳态情况下,我们考虑式(1)的解.

边界条件:在表面 $z=0$ 处, $D \frac{\partial p}{\partial z} (p) = V_s p$;在结 $x=0$ 处, $p=0$ (所有的少数载流子被结抽走);在 $x=L$ 处, $D \frac{\partial p}{\partial x} (p) = 0$ (少数载流子不能穿过 $x=L$).

Van Roosbroeck^[2]和 Berz^[3]提出,边界条件可以通过引入在 $(x_c, y_c, -z_c)$ 的“虚”点源和一个从

$(x_c, y_c, -z_c)$ 到 $(x_0, y_0, -z_0)$ 的“虚”线源,并用静电场的镜像电荷法处理.最终获得稳态光注入下解的表达式为^[7]

$$j_{light}(x, k) = G_0 k \int_0^{z_0} j_{seminf}(x, z) \exp(-kz) dz = \frac{2 G_0 k}{L_p} \frac{x}{L_p} \left[\frac{V_s / D_p}{k(V_s / D_p - k)} \exp(-kz) \cdot \frac{K_1((x^2 + z^2)^{1/2} / L_p)}{(x^2 + z^2)^{1/2} / L_p} dz - \frac{1}{(V_s / D_p - k)} \exp\left(\frac{-V_s}{D_p} z\right) \frac{K_1((x^2 + z^2)^{1/2} / L_p)}{(x^2 + z^2)^{1/2} / L_p} dz \right] \quad (4)$$

式中: K_1 为第二类修正的 Bessel 函数; V_s 为表面复合速率 (cm/s); D_p 为少数载流子扩散常数 (cm²/s); k 为吸收常数 (1/cm).

从以上的分析可以看出,光点扫描过耗尽区两端后获得的 OBIC 曲线,其上升沿和下降沿的变化可以用式 (4) 的归一化结果来描述.在采用同一束光对硅表面照射测量耗尽区宽度时,从 p 型区向 n 型区进入耗尽区边界或者从 n 型区向 p 型区进入耗尽区边界,光的吸收系数 k 对 OBIC 曲线上升陡度的影响应当为最小,这样对测量宽度是有利的. He-Ne 激光波长对应的吸收系数大约为 3 200 cm⁻¹,这样的吸收系数按式 (4) 计算出的结果可以看出是具有非常陡的上升沿,在硅中的透射深度约 3.1 μm,因此适用于测量耗尽区的测量.根据光照射在被测元件表面不同位置时外电路光电流的大小,可以获得被测空间电荷区较直观的表达,并且测量曲线反映出硅表面状态的影响.

2 结果与讨论

实验中采用的测试设备为高压硅器件表面耗尽区测量专用的激光探针测试系统. He-Ne 激光功率 < 2.5 mW,出光孔用黑色毛纸遮光以防止光在硅台面和镜头之间发生强反射.台面与光点之间位置通过精细调整以获得聚焦光束和足够的光斑功率.光照产生的电流在几微安(无外加反向电压)至几十毫安(外加反向偏压,器件被升温以模拟运行时的器件温度)之间.本节利用改进后的数据采集控制系统,研究硅器件常温下的耗尽区展宽与电压的关系.

2.1 单斜角造型硅器件耗尽区展宽

测试采用某电机厂提供的硅整流元件,耐压在 3 700 V 以上,正角造型磨角,斜角角度小于 10°,SP

硅漆表面保护.实验的环境温度为 20°,外加电压采用逐级升压的方式,分别测量在不同电压下表面耗尽区的展宽.光点扫描位移 (S) 变化时,测量 OBIC 电流 (I_{OBIC}) 获得的 OBIC 曲线如图 3 所示,器件表面正斜角造型角度为 7°.

从图 3 中可以看到,光从 p 型区域的耗尽区边界扫描过整个结区域时,光感生电流曲线具有如下特点:在左侧重掺杂的 p 型区域,小的正角造型角度使 p 型处耗尽区的边界几乎处于其物理边界上,并被“钉扎”在原处;耗尽区 n 型区处的边界随着外加电压的升高朝 n 型基区扩展.光电流的变化反映出耗尽区的展宽最终在 n⁺ 区域被截止,这也表明过快的耗尽区展宽会因快速到达 n⁺ 区而使得 n⁺ 区的电场增强,造成局部电场集中.经过表面钝化保护处理后,p 型区域和 n 型区域少数寿命的不同是影响整个曲线边沿变化急缓的主要因素.

图 4 给出了表面钝化保护不良的器件在外加电压增加的情况下,表面特性迅速劣化的状态,器件表面正斜角造型角度为 8°.在靠近 n⁺ 区域附近 n 型区域内,OBIC 曲线出现尖峰,表明耗尽区过早扩展到 n⁺ 区域.由于 n⁺ 区域的阻挡,使得电压升高时,该处电场集中、增强,光注入的载流子在此处发生雪崩倍增.这样的器件在工作温度下 (150 °C) 无法达到设计耐压,耐压特性表现为表面特性器件.

2.2 硅表面不同腐蚀时间的 OBIC 结果

采用机械磨削造型的大功率硅器件,造型过程中产生的表面损伤以及磨削过程中的油水污染,如拉丝、划痕、斑点、尘埃、油污等的存在,很容易吸附电荷,致使器件的表面态发生变化,使得器件必须进行超声洗涤和钝化腐蚀.功率半导体生产过程中常用的腐蚀钝化一般采用冰醋酸加 HNO₃ 加 HF 混合液定时冲洗,获得光亮的钝化表面.腐蚀时间的长

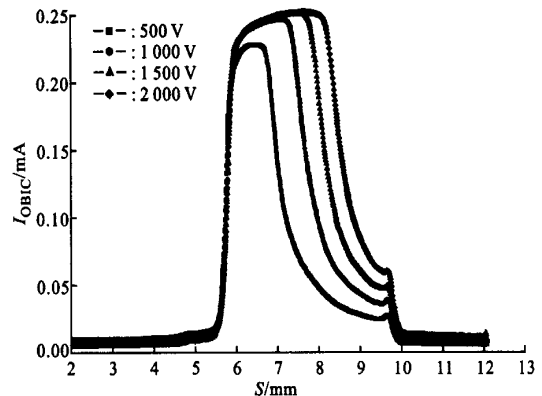


图 3 高压硅器件表面耗尽区展宽

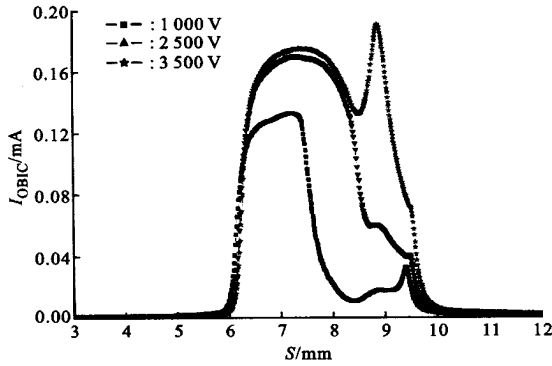


图4 表面钝化保护效果不良时,OBIC反映出的电场集中

短会影响硅器件结终端台面处的少子寿命和表面态.图5和图6分别给出同型号器件不同腐蚀时间下的OBIC特性曲线,该型号器件标准腐蚀处理时间为24 s.

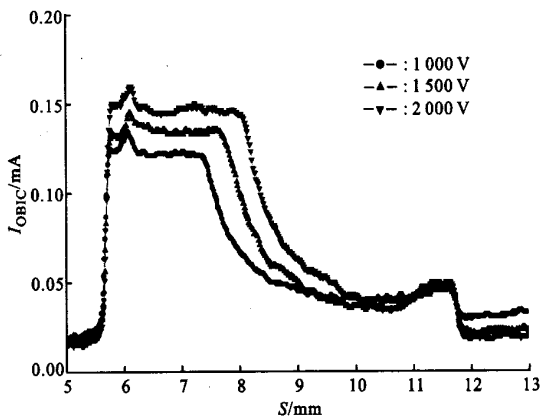


图5 钝化腐蚀时间为18 s的裸管芯OBIC测量曲线

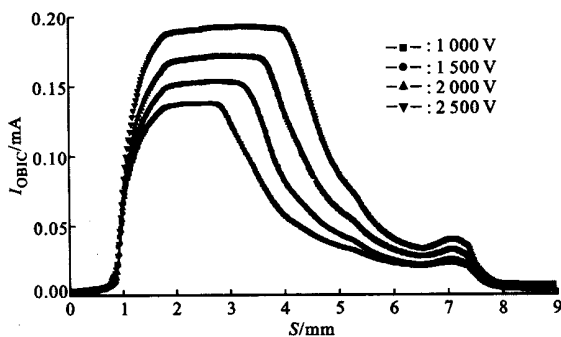


图6 钝化腐蚀时间为30 s的裸管芯OBIC测量曲线

从OBIC曲线上可以看出,当激光束从p区向n区扫描时,腐蚀时间长的试样比腐蚀时间短的试样的OBIC曲线上升沿平缓,这说明存在变长的少子寿命.整个曲线的不平滑性也说明了裸管芯表面状态的复杂性,即存在大量缺陷造成的复合中心而使腐蚀时间较短的裸管芯表面载流子的寿命较短.

相应地,硅整流器件的反向漏电流也有所增大.

3 结论

本文结合研究介质膜与硅p-n结界面特性的实际需要,采用OBIC法,利用激光探针表面电荷测量系统,研究了硅功率器件台面造型的表面耗尽区特性.实验和理论结果表明,OBIC法可直观准确地用于硅表面耗尽区展宽的描述.当采用He-Ne激光束扫描硅台面器件时,其较大的吸收系数和适宜的透射深度,使得从p区向n区或者从n区向p区扫描时,对OBIC曲线边缘的陡度影响较小.外加反向偏置电压下,OBIC曲线不仅可反映结扩展状态,并可以直接观察到表面钝化保护的效果和表面电场分布状态.对表面腐蚀处理时间不同的硅器件,OBIC测量结果表明,腐蚀处理时间对表面少子寿命影响明显,从曲线上沿陡度变化就可以直接看出这一影响.

参考文献:

- [1] Sandoe J N, Hughes J R. EBIC and LBIC techniques for characterisation of reverse biased power devices [J]. Acta Electronica, 1983, 25(3):201~209.
- [2] Roosbroeck W V. Injected current carrier transport in a semi-infinite semiconductor and the determination of lifetimes and surface recombination velocities [J]. Journal of Applied Physics, 1955, 24(4):380~391.
- [3] Berz F, Kuiken H K. Theory of lifetime measurements with the scanning electron microscope: steady state [J]. Solid-State Electronics, 1976, 19(6):437~445.
- [4] Stengl R. High-voltage planar junctions investigated by the OBIC method [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1987, 34(4):911~919.
- [5] Soelkner G, Kreutle J, Quincke J, et al. Back side optical beam induced current method for the localization of electric field enhancements in edge termination structures of power semiconductor devices [J]. Microelectronics Reliability, 2000, 40(8-10):1641~1645.
- [6] 王卉.有机保护材料与硅器件台面间等效电荷的测量与研究[D].西安:西安交通大学电气工程学院,1994.
- [7] Flohr T, Reinhard H. Determination of the spatial variation of the carrier lifetime in a proton-irradiated Si n⁺-n-p⁺ diode by optical-beam-induced current measurements [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1990, 37(9):2076~2079.

(编辑 杜秀杰)