

紫外灵敏的表面型硅光电探测器

张 范 岳

(中山大学微电子研究所)

1984年12月19日收到

本文从理论上分析了利用 SiO_2/Si 界面电荷造成 Si 表面耗尽和反型的性质, 制成紫外光响应灵敏的表面型硅光电探测器的可行性, 并在实验上加以证实。利用这种方法研制成功的光电探测器具有如下特性: 7,000 Å 附近的响应灵敏度为 0.57A/W、3,300 至 10,300 Å 范围内的相对响应大于 20%、暗电流为 0.35nA、反向击穿电压为 140V 以及响应时间为 10^{-7}s 。

一、概 述

P-N 结型光电探测器具有体积小、重量轻、能耗少、响应速度快, 以及噪声低等优点, 使其成为目前光接收, 光度学和光电自动控制装置中不可缺少的光电传感元件。但是, 这种元件由于受到 P-N 结深度的限制, 其短波光谱响应灵敏度不容易做得好。因此, 在使用上受到一定的限制。

由分析可知, P-N 结型光电探测器的等能光谱响应为:

$$R \sim \lambda \left\{ \frac{\alpha L_p}{\alpha L_p - 1} e^{-\frac{(\alpha L_p - 1)d_0 + \omega_1}{L_p}} - \frac{1}{\alpha L_p - 1} e^{-\alpha \omega_1} \right. \\ \left. - \frac{1}{\alpha L_n + 1} e^{-\alpha \omega_2} \right\}. \quad (1)$$

其中,

λ —光波的波长;

α —半导体对光子的吸收系数;

L_p —P-N 结 N 区中空穴的扩散长度;

L_n —P-N 结 P 区中电子的扩散长度;

d_0 —P-N 结表面死区的宽度;

ω_1 —P-N 结耗尽区的 N 区边界距离表面的深度;

ω_2 —P-N 结耗尽区的 P 区边界距离表面的深度。

由(1)式可知, 当投射到 P-N 结上的光子波长很短时, 因为半导体对光子的吸收系数 α 很大, 故(1)式的大小主要由第一项决定。且, 当 d_0 和 ω_1 越小时, 光谱响应越好。

然而, 不管是利用离子注入, 还是穿透二氧化硅扩散的方法^[1], 都无法使 $\omega_1 = 0$, 或使 P-N 结的耗尽区的边界位于表面。这就是 P-N 结型光电探测器短波响应不好的根本原因。

为此, 我们利用 SiO_2/Si 界面电荷造成 Si 表面反型和耗尽的现象, 制造 $\omega_1 \approx 0$ 的表

面型光电探测器。实验证明，这种方法制造的光电探测器，不仅具有良好的短波光谱响应，而且制造工艺也比较简单。

二、 实 验

1. 硅材料电阻率的选定

由理论和实验的结果可知，高温湿氧条件下，硅表面生长的 SiO_2 和 Si 表面间 SiO_2 一侧，存在 10^{10} — 10^{12}cm^{-2} 的正界面电荷 Q_{ss} 。从而，在 P-Si 表面感应形成一层空间电荷层。其电荷密度

$$Q_{ss} = Q_s + Q_{SD} \quad (2)$$

其中， Q_s 为 P-Si 表面反型层的电荷密度， Q_{SD} 为表面耗尽层的电荷密度。

对于同一 Q_{ss} ，不同电阻率 ρ 的 P-Si 的表面耗尽和反型的程度各不相同。为保证实现表面反型，可以按文献 [2] 提供的 P-Si 材料杂质浓度 C_B 为参量、表面耗尽区宽度 x_d 与界面电荷密度 $|Q_{ss}/q|$ 的关系曲线中确定。如图 1 所示。

按我们的工艺条件，对(111)晶向的 P-Si 材料进行热氧化，经电容-电压法测定，获得的 SiO_2/Si 界面电荷密度 $Q_{ss} \approx 2 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ 。

由图 1 可知，在这种界面电荷密度下，使 Si 表面出现强反型的材料电阻率应是 $2\Omega\cdot\text{cm}$ 。如考虑到 P-Si 经热氧化后，表面杂质浓度的降低^[3]，还可以把材料的电阻率稍选低一点。

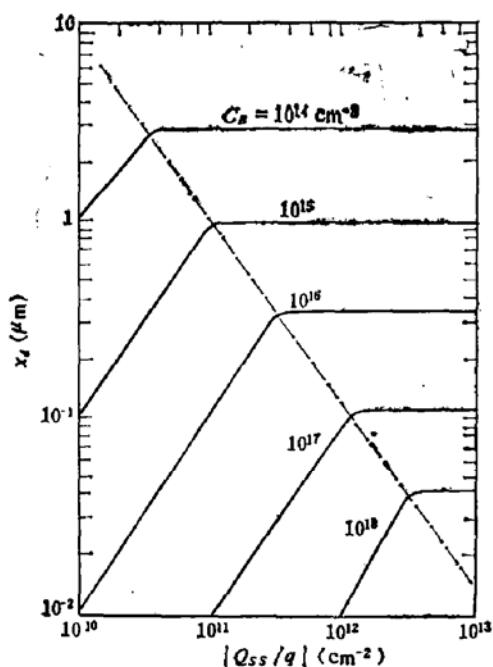


图 1 表面耗尽区宽度 x_d 与 SiO_2/Si 界面电荷密度 $|Q_{ss}/q|$ 的关系曲线

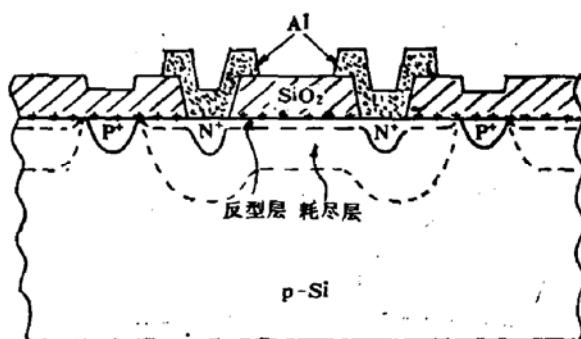


图 2 表面型光电探测器剖面图

2. 光电探测器的结构考虑

为了把表面耗尽区与其边缘一扩散长度内的光生载流子引出，必须如图 2 那样，按一定的间距形成 P-N 结，使扩散 P-N 结的 N 区与表面反型层的 N 区相连接，以便引出光生电流。

然而，因为 Si 表面上形成的反型层布及整个硅片表面。必须切断光敏区以外的表面沟道，以防止表面沟道的漏电。

由图 1 可知，只要在光敏区周围扩散上一高浓度的 P 型环状区，便能阻止环状区出现表面反型。因此，表面沟道完全被切断。

三、结果与讨论

1. 表面型硅光电探测器的光谱响应

图3和图4分别显示了按本文的设计考虑研制成功的光电探测器的等能光谱和等能相对光谱曲线。为便于比较，在图中还分别绘出了美国ORIEL公司1979年产品介绍文献[4]中列出的7180和7184系列硅光电二极管的光谱曲线。

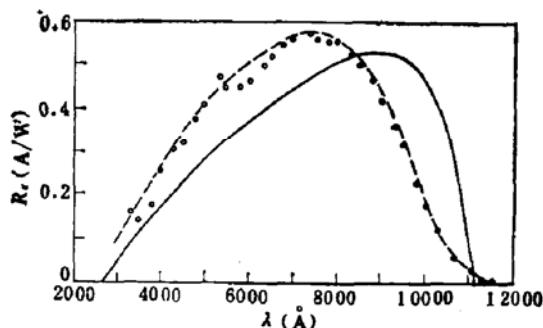


图3 等能光谱响应曲线
----16# 表面型光电探测器曲线
——美国 ORIEL 公司 7184 系列光电二极管曲线

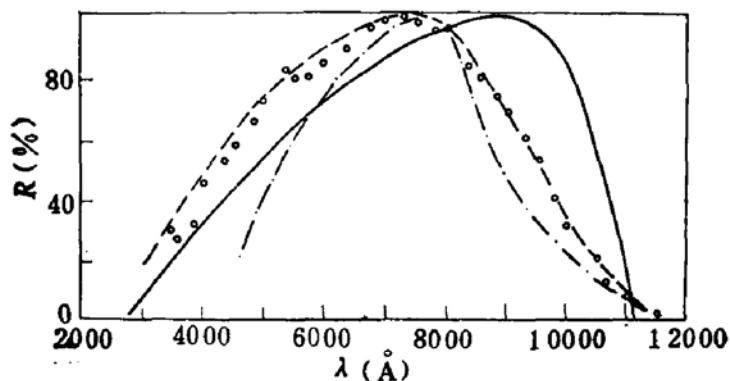


图4 等能相对光谱响应曲线
----16# 表面型光电探测器
---文献[5]的 P-N 结型光电二极管
——美国 ORIEL 公司 7184 系列光电二极管

由图3和图4可知，表面型光电探测器的峰值响应灵敏度为 0.57 A/W ，在 $3,300\text{ Å}$ — $10,300\text{ Å}$ 波长范围内，相对响应均大于20%。可用于连续探测近紫外至近红外的光波。

必须指出，本文提到的表面型光电探测器，是采用透明环氧树脂封装。而且封装前的探测器也未加增透膜。在测量时对反射以及树脂的吸收（尤其对紫外光的吸收）的损失均未计入。因此，实际的光谱响应比图中曲线还要好一些。

2. 暗电流

16#管在3伏反偏压下的暗电流为 $3.5 \times 10^{-10}\text{ A}$ ，击穿电压为140伏，硬击穿。如果选用更优质的衬底材料，在设计上尽量减少P-N结占用的硅片面积（上述设计中占探测器总面积的35%），适当降低衬底材料的电阻率（上述实验中选用的材料电阻率为5—

$8\Omega\text{-cm}$), 以及选择具有超净环境的工艺条件, 可望把暗电流降低 1 至 2 个数量级。

就 16# 管而言, 在 $3,400\text{ \AA}$ 的紫外光的响应为 $0.117\mu\text{A}/\mu\text{W}$, 而 -3V 时的暗电流为 $0.00035\mu\text{A}$. 其光电流比暗电流大 300 倍以上。因此, 可以进行非常微弱的紫外光测量。

3. 响应速度和噪声等效功率

16# 在 100KHz 测试频率下, 测得结电容 $c_j = 100\text{pF}$ 、响应的上升时间 $t_r = 50\text{ns}$ 、下降时间 $t_f = 200\text{ns}$. 在 -3V 时, 入射光波长 $\lambda = 0.73\mu\text{m}$ 、调制频率为 400Hz 和单位带宽 1Hz 时测得的噪声等效功率 NEP 为 $1.66 \times 10^{-13}\text{W}/\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$.

如减少引线用的 P-N 结面积, 并选用高阻外延材料, 以减少结电容和探测器的串连电阻, 可望进一步提高探测器的响应速度和减少噪声。

4. 照度特性

在 $50\text{--}400\text{Lux}$ 的光强测量范围内显示出非常好的光生电流-照度关系的直线性, 为使用提供了方便。

四、结 论

实验结果证明, 利用 SiO_2/Si 界面电荷造成 Si 表面反型和耗尽的性质, 可以用来制造紫外光响应灵敏的表面型硅光电探测器。与 P-N 结型光电二极管比较, 在特性和制造工艺方面都具有显著的优越性。

参 考 文 献

- [1] 张苑岳、江任荣, 半导体技术, No.2, 12(1980).
- [2] [美] H. F. 沃尔夫编, 天津半导体器件厂译, «硅半导体工艺数据手册» 国防工业出版社, p. 243(1975).
- [3] 同 2, p. 241.
- [4] ORIEL Corporation, complete catalog of OPTICAL SYSTEMS & COMPONENTS, F 17 (1979).
- [5] L. M. Terman, Solid. State Electron., 2, 1(1961).

Silicon Photodiode of Surface Type Sensitive to Ultraviolet Rays

Zhang Yuanyue

(Institute of Microelectronics, Zhongshan University)

Abstract

Theoretical feasibility for manufacturing Silicon photodiode of surface type sensitive to ultraviolet rays is analysed using the properties of silicon surface inversion and depletion formed by SiO_2/Si interface charge and verified by experiments. The properties of photodiode made by this way are as follows: the peak responsibility near 7000 \AA with 0.57 A/W , the relative responsibility in the range from 3300 \AA to 10300 \AA greater than 20%, the leakage current (reverse bias for 3 V) without illumination 0.35 nA , the breakdown voltage 140 V and response time 10^{-7}s .