

重结硅光电二极管

尹长松 朱德光 石端云 赵有伦 胡淑纯

(武汉大学物理系)

1982年5月7日收到

提 要

本文提出了一种重结光电二极管结构。这种结构由一个接近表面的浅结和一个较深的结组成，这两个结可以分别有效地收集产生在接近表面的和产生在体内的光生载流子，这对于提高光电二极管从短波长到长波长光的响应都是有利的。通过对所作实验样品的光谱响应灵敏度的测量，说明重结光电二极管结构对改善光电器件的光谱响应是有效的。

由于硅对光的吸收系数与波长的关系很大，从紫外光到近红外光，吸收系数可相差三个数量级以上。为了提高对短波长光的量子效率，则要求作很浅的 p-n 结，而为了提高对长波长光的量子效率，则要求作较深的 p-n 结。为了使器件能适应宽的光谱响应的要求，在本文的工作中制得了一种能满足上述两方面矛盾要求的双重 p-n 结光电二极管。

重结光电二极管的剖面如图 1，它由一个接近表面的、很浅的 n⁺-p 结和一个深入表内、较深的 p-n⁻ 结组成，并将表面 n⁺ 区和衬底 n⁻ 区连接在一起，构成双重结二极管。它不仅因有两种深度的 p-n 结，能适应短的和长的波长光的响应，而且在不增加芯片面积的情况下，使光生载流子的有效收集结面积得到增加，从而可以改善光谱响应。

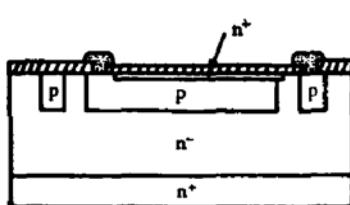


图 1 重结光电二极管结构

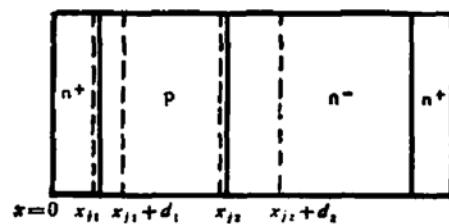


图 2 重结分析模型

一、分 析

对于一个重结光电二极管，有五个区域分别对光电转换有贡献。如图 2：① 表面 n⁺ 区，结深为 x_{j1} ；② n⁺-p 结势垒区，宽度为 d_1 ；③ p 型扩散区，宽度为 $[x_{j2} - (x_{j1} + d_1)]$ ；④ p-n⁻ 结势垒区，宽度为 d_2 ；⑤ n⁻ 衬底区，包括 n⁻-n⁺ 衬底高低结。

若将两个结都作单边突变结处理，且作一维小讯号分析，忽略势垒区的复合，可以得到考虑这五个区域的重结光电二极管等能量光谱响应光电流的近似表示式为^[1,2]：

$$I_L = kq\lambda \left[\frac{e^{-\alpha x_{j1}}}{1 - \alpha L_{p1}} - \frac{\alpha L_{p1}}{1 - \alpha L_{p1}} e^{-\frac{(0.7+0.3\alpha L_{p1})}{L_{p1}} x_{j1}} + e^{-\alpha x_{j2}} \right. \\ \left. - \frac{e^{-\alpha(x_{j1}+d_1)}}{1 + \alpha L_n} - \frac{e^{-\alpha(x_{j2}+d_2)}}{1 + \alpha L_n} - \frac{\alpha L_n}{1 + \alpha L_n} e^{-\frac{(1+\alpha L_n)x_{j2}-(x_{j1}+d_1)}{L_n}} \right].$$

式中 k 为任意常数, λ 光波波长, L_{p1} 、 L_{p2} 分别为 n^+ 、 n^- 区空穴扩散长度, L_n 为 p 型杂质扩散层内电子扩散长度, α 吸收系数。在式中考虑到 n^+ 区杂质浓度较高, 光生少子寿命较低, 有所谓“死层”存在, 在作浅结扩散时, “死层”厚度可达结深的三分之一左右^[3,4], 在上式中认为表面层 $0.3x_{j1}$ 范围内光生少子对光电流没有贡献。

二、实 验

试验样管用两种不同的材料, 一为硅单晶材料, 电阻率 $\rho \approx 100\Omega\text{-cm}$, 另一为外延硅材料, $\rho \approx 4\Omega\text{-cm}$, 外延层厚度 $(15-17)\mu\text{m}$ 。重结结深选择为: $x_{j1}=0.3\mu\text{m}$, $x_{j2}=4\mu\text{m}$ 。为比较起见, 分别作了单一浅结和单一深结样管, 结深分别为 x_{j1} 和 x_{j2} , 结面积均为 $1(\text{mm})^2$ 。

光谱响应灵敏度的测量: 光源用溴钨灯和汞灯, 单色仪分光, 以 $\phi 0.5\text{mm}$ 的光阑限定入射至光电二极管的光功率。光功率以 IL-700 型研究辐射计(美国 IL 公司)测量。二极管的工作电压为 3 伏。

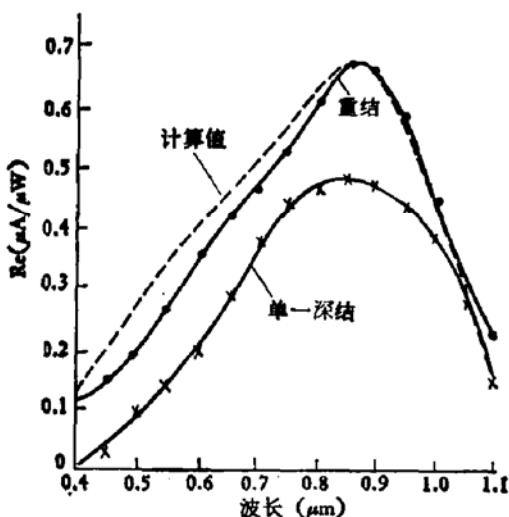


图 3 单晶材料样管结果

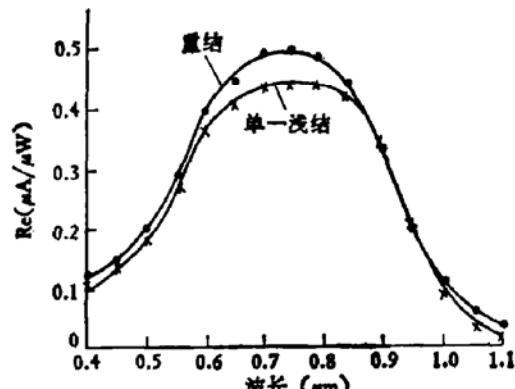


图 4 外延材料样管结果

对于单晶样管的测量结果如图 3。图中给出的是重结与单一深结的结果。图中的虚线曲线为用理论示式计算的结果, 计算中有关参数取以下的值: $x_{j1}=0.3\mu\text{m}$, $d_1=0.3\mu\text{m}$, $x_{j2}=4\mu\text{m}$, $d_2=10\mu\text{m}$, $L_{p1}=0.1\mu\text{m}$, $L_{p2}=60\mu\text{m}$, $L_n=3\mu\text{m}$, α 由精确经验公式^[5]得到。计算曲线的纵坐标为任意单位。

图 4 给出的是外延材料样管的测量结果, 这是重结与单一浅结的比较。

三、讨 论

对于单晶材料样品，重结结构不仅保持了良好的长波长光的响应，而且在整个测量波长范围内，光谱响应要比单一深结好。重结的深结可保证对长波长光的响应，对于中等波长的光，则深、浅双重结均可起作用，使重结样管有更高的峰值响应。重结的浅结可有效地响应短波长的光。因此，重结光电二极管的光谱响应得到了较好的改善。

对于外延材料样管，由于外延层厚度的限制，长波长光的响应受到限制，因此图4中两种样管对长波长光的响应都较低。由于单一浅结样管的结深与重结样管浅结的结深相近，两种样管有相近的短波长光的响应，这是容易理解的。但图中约 $0.6\mu\text{m}$ 至 $0.85\mu\text{m}$ 波长范围内，重结的响应优越于单一浅结，这是因为在这段范围内，具有中等大小的吸收系数，重结的两个结都能对光生载流子起收集作用，从而使响应得到提高。

实验结果说明，重结结构是改善光电二极管光谱响应较好的结构。

参 考 文 献

- [1] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Chapter 12, John Wiley & Sons (1969).
- [2] 尹长松，武汉大学学报（自然科学报）1981年第4期。
- [3] J. Lindmayer et al., *Comsat Tech. Rev.* 3, 1 (1973).
- [4] P. A. Iles et al., *Solid State Electronics*, 5, 331 (1962).
- [5] W. E. Philips, *Solid State Electronics*, 15, 1097 (1972).

A Double-Junction Silicon Photodiode

Yin Changsong, Zhu Deguang, Shi Duanyun

Zhao Youlun and Hu Suchun

(Department of Physics, Wuhan University)

Abstract

A double-junction structure of photodiode is proposed. The structure is comprised of a shallow junction near the surface of the diode and a deep junction in the diode. Both shallow and deep junctions can effectively receive carriers generated by light near the surface and in the bulk of the diode, respectively. It is very advantageous for the photodiode to response to the light from short to long wave length. Using single crystal and epitaxial wafer of silicon, samples are made and their response sensitivity is measured. The results demonstrate that the double-junction structure is very useful for improving the spectrum response of the photodiode.