

表面型光电二极管光谱响应的计算

张苑岳

(物理学系)

摘 要

本文介绍了在应用耗尽层理论计算 SnO_2/Si 异质结、表面耗尽型和激光诱导扩散P-N结型光电二极管的相对光谱响应和响应峰值时的一个简化模型。以等效“死层”厚度概括界面晶格失配、表面损伤和玷污造成的表面缺陷层深度,既简化了计算,又能较好地反映二极管的实际情况。对三种不同类型的五个样品进行计算,结果与实验相吻合。文章指出,等效“死层”越窄、耗尽层越厚以及少子寿命越长,二极管的绝对响应灵敏度越高,“死层”越窄和少子寿命越短,则等能光谱响应峰值对应的波长越短。

一、引 言

光谱响应是光电器件的基本参数,是器件内部光电子过程的宏观表征,是研究半导体内载流子产生、复合和输运过程的基本方法。对于一般的P-N结光电二极管的光谱响应,早在1961年,L.M.Terman就用耗尽层理论进行了计算^[1],其结果与实验一致。但是,对于 SnO_2/Si 异质结、表面耗尽型以及激光诱导扩散P-N结型光电二极管,光谱响应的计算可以进一步简化。原因在于,上列三种类型的光电二极管,几乎都可认为是表面型的器件,表面层处于电场区中。

为了避免涉及表面附近非平衡载流子具体的复合过程的复杂性,我们在计算时引入等效“死层”宽度的概念,以概括表面附近一定深度范围内的各种复合过程。结果与实验吻合。它既能反映以上三种类型的光电二极管的光谱响应,在考虑试制某一预定的光谱响应特性的光电器件时又能提供选取材料参数和工艺要求的依据。例如,拟制备光谱响应峰值在视感最灵敏的波长(5,550 Å)位置的表面耗尽型光电二极管时,可选电阻率 ρ 为 $7\Omega\text{-cm}$ 、加工后电子的扩散长度为 $2.5\mu\text{m}$ 的P-Si材料,而且要保证其等效“死层”宽度为 $2,000\text{ Å}$ 左右。

相反,我们也可以根据实验测定的光谱响应曲线,在预知材料电阻率的情况下,按理论推算出加工后少子寿命的变化和表面损伤层的深度。

二、简化的计算模型

SnO_2/Si 异质结的界面附近是耗尽区。因为 SnO_2 是简并半导体,耗尽层主要在Si衬

• 本文于1982年11月收到。

底一边,而且SnO₂是一种宽禁带(E_g≈3.5eV)的半导体⁽²⁾,在可见光区几乎是完全透明的。表面耗尽型光电二极管的SiO₂/Si界面上、SiO₂一侧存在某一密度的正的界面电荷,使Si一侧感应形成一反型层和耗尽层,而激光诱导扩散可形成非常浅的P-N结(t_j≈1,000Å)⁽³⁾。因而上列三种类型的光电二极管,都可以认为其表面层是处于电场区之中,即表面处于耗尽层内。

当可见光透过SnO₂/Si或SiO₂/Si界面,进入硅晶体并逐步被吸收时,在Si表面下一定厚度范围内产生电子-空穴对。由于SnO₂/Si或SiO₂/Si间晶格失配的应力作用、表面损伤和玷污造成的表面缺陷,使表面附近形成一层高复合层。在其中,非平衡载流子的复合速度极高,而且越接近表面,复合速度越高。但是,为了计算的方便,可以把这一高复合层对光生非平衡载流子的复合作用看成完全集中在一更薄的称为等效“死层”d₀的厚度范围内,在d₀范围内的非平衡载流子的复合速度为无限大。相应于d₀范围内非平衡载流子的密度为零。当某一波长的单色光投射在衬底Si上时,在Si体内产生的电子-空穴对密度的一维分布为

$$G(x) = 0, \quad \text{当 } x < d_0$$

$$G(x) = N_0 \alpha e^{-\alpha x}, \quad \text{当 } x \geq d_0 \quad (1)$$

这里

G(x) 为距表面x处的电子-空穴对的产生率;

N₀ 为x=0处的光子通量;

α 为Si对入射光的吸收系数,是波长的函数。

图1绘出了(1)式所示的分布函数。取界面位置x=0; x=0至x=W为表面耗尽区,其中x=0至x=d₀为等效“死层”宽度, L为少子的扩散长度。

由图1可知,在d₀≤x≤W范围内的光生载流子在耗尽层电场的作用下,将很快被扫出电场区,形成漂移光生载流子电流密度J_{dr};而在W<x≤W+L范围内的光生载流子,将以扩散的形式进入耗尽层,并在耗尽层电场的作用下,被扫出耗尽层,形成光生扩散电流密度J_{diff}。总的电流密度

$$J = J_{dr} + J_{diff} \quad (2)$$

由x=d₀至x=w对(1)式积分,得:

$$J_{dr} = q N_0 (e^{-\alpha d_0} - e^{-\alpha W}) \quad (3)$$

由x>W时,半导体内光生载流子密度分布的一维扩散方程

$$D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p - p_0}{\tau_p} + G(x) = 0 \quad (4)$$

以及边界条件: x=W, p=0和x=∞, p=p₀可求得在x=W处光生载流子的扩散电流密度

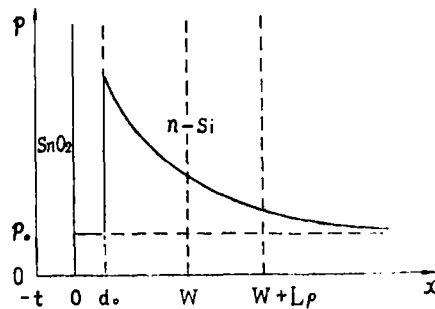


图1 表面型光电二极管光生载流子分布剖面图

$$J_{diff} = qN_0 \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} e^{-\alpha w} + q p_0 \frac{D_p}{L_p} \tag{5}$$

因此

$$J = qN_0 \left[e^{-\alpha d_0} - \frac{e^{-\alpha w}}{1 + \alpha L_p} \right] + q p_0 \frac{D_p}{L_p} \tag{6}$$

把入射光子的能流密度与波长的关系

$$E = N_0 \frac{hc}{\lambda} \tag{7}$$

代入(6)式,并认为在室温时,(6)式第二项比第一项小很多,可以忽略。于是,等能相对光谱响应可以下式表示:

$$R = \left| \frac{Jhc}{qE} \right| = \lambda \left[e^{-\alpha d_0} - \frac{e^{-\alpha w}}{1 + \alpha L_p} \right] \tag{8}$$

式中, h 为普朗克常数; E 为能流密度; q 为电子电荷; c 为光速; λ 为入射光的波长; p 为 $n-Si$ 中的空穴密度; p_0 为热平衡时的空穴密度。

在波长 λ 为 $4,500 \text{ \AA}$ 至 $8,000 \text{ \AA}$ 范围内, 可把 α 表示成: $\alpha = \alpha_0 e^{-\lambda/k}$ (9)

其中 $\alpha_0 = 464159,$

$k = 1302.7 \text{ \AA}.$

(8)式对 λ 求微商, 令其为0, 对应的波长 λ_0 即为等能光谱响应峰值对应的波长。结果为

$$e^{-(w-d_0)\alpha} = \frac{(k + d_0 \lambda \alpha)(1 + L_p \alpha)^2}{(k + W \lambda \alpha)(1 + \alpha L_p) + L_p \lambda \alpha} \tag{10}$$

对(10)式图解可求得 λ_0 。

三、计算结果与实验的比较

据已知衬底材料的电阻率所对应的耗尽层宽度, 适当选取等效“死层”厚度 d_0 和少数扩散长度 L_p , 按(8)和(10)式便能计算得到与实验相一致的表面型光电二极管的等能相对光谱响应曲线及其峰值所对应的波长 λ_0 。

图2和图3分别为非掺杂 $SnO_2/n-Si$ 和掺杂 $SnO_2:Sb/n-Si$ 异质结光电二极管零偏压时的等能相对光谱响应曲线。图中虚线表示用负压雾化

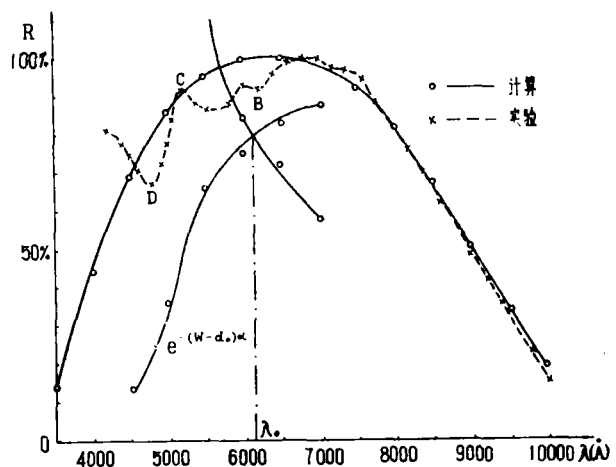


图2 $SnO_2/n-Si$ 异质结光电二极管等能相对光谱响应

热水解方法⁽⁴⁾制备的异质结光电二极管的光谱响应的实验曲线。因为二样品具有相同

的衬底材料电阻率 $\rho = 3.5 \sim 4.0 \Omega\text{cm}$ ，零偏压时的耗尽层宽度均为 $W \approx 0.65 \mu\text{m}$ 。图2和图3中的实线就是分别取 $W = 0.65 \mu\text{m}$ 、 $d_0 = 400 \text{ \AA}$ 、 $L_p = 10 \mu\text{m}$ 和 $W = 0.65 \mu\text{m}$ 、 $d_0 = 1,200 \text{ \AA}$ 、 $L_p = 7 \mu\text{m}$ 计算的结果。由图中曲线和峰值对应的波长 λ_0 可知，计算与实验相一致。

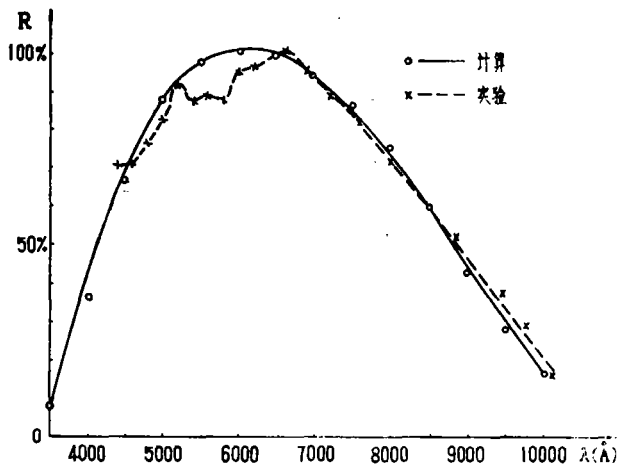


图3 $\text{SnO}_2\text{:Sb/n-Si}$ 异质结光电二极管等能光谱响应

图4和图5分别为零偏压下二个激光诱导扩散的P-N结型光电二极管样品的等能相对光谱响应曲线。虚线是在电阻率 $\rho = 2 \sim 3 \Omega\text{-cm}$ 的n型Si衬底上，激光诱导扩散结深 $x_j \approx 1,000 \text{ \AA}$ 的P-N结的光谱响应曲线⁽⁵⁾。实线为分别以 $W = 0.62 \mu\text{m}$ 、 $d_0 = 400 \text{ \AA}$ 、 $L_p = 5 \mu\text{m}$ 以及 $W = 0.62 \mu\text{m}$ 、 $d_0 = 400 \text{ \AA}$ 、 $L_p = 3 \mu\text{m}$ 代入(8)和(10)式计算得到的结果。

图4和图5表明计算与实验同样具有相当好的一致性。

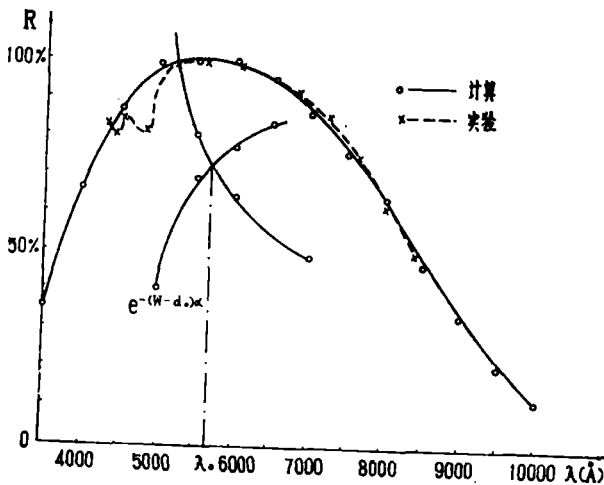


图4 激光诱导扩散P-N结光电二极管零偏压下的等能相对光谱响应曲线(样品I)

图6是表面耗尽型光电探测器零偏压时的等能相对光谱响应曲线。虚线为文献[5]的实验曲线。其p型硅衬底材料的电阻率 $\rho = 7 \Omega\text{-cm}$ ，对应的零偏压耗尽层宽度 $W \approx 0.6 \mu\text{m}$ ，并取 $d_0 = 2,000 \text{ \AA}$ 、 $L_n = 1.5 \mu\text{m}$ ，按(8)式计算，所得结果以实线表示。并由(10)式图解得响应峰值对应的波长 λ_0 。

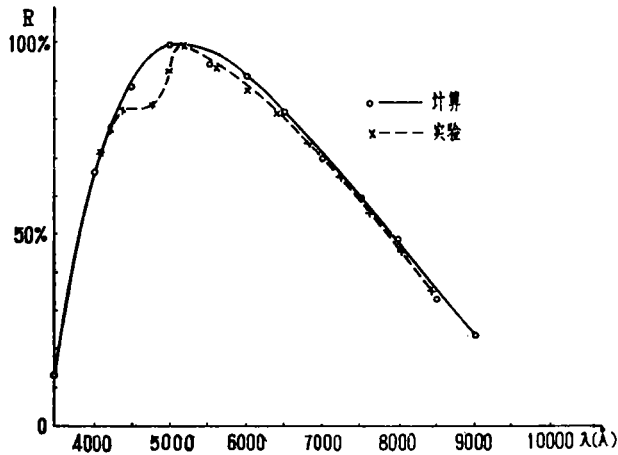


图5 激诱导扩散P—N结光电二极管零偏压下的等能相对光谱响应曲线(样品Ⅰ)

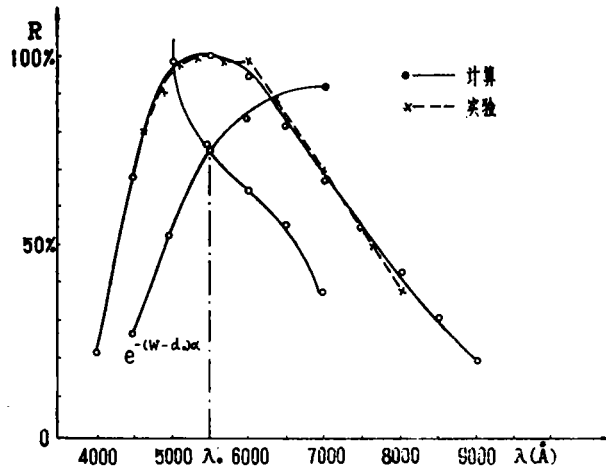


图6 表面耗尽型光电二极管零偏压等能相对光谱响应

四、 讨 论

1、利用简化理论模型导出的(8)和(10)式，可以相当好地表征上述三种类型的光电二极管的光谱响应。由(8)式可知，二极管的等效“死层”越薄，材料电阻率越高，即耗尽层宽度越大和少子的寿命越长，光电二极管的绝对灵敏度越高。由(10)式的图解可知， d_0 、 W 和 L_p 越小，响应峰值对应的波长越短。

2、利用(8)和(10)式，可以估计试图获得某一光谱分布或给定的响应峰值所对应的波长的表面型光电二极管所应选取的材料参数 ρ 、 τ 和工艺参数 d_0 。可以减少研制的盲目性。

3、图2、3、4和5中，曲线有小的峰谷状变化，是由于 SnO_2 或 SiO_2 薄膜增反射和增透射所致。例如，图2中的 SnO_2 薄膜厚度为 $t = 3,500 \text{ \AA}$ 、图3中的 SnO_2 薄膜厚度

$t = 1500 \text{ \AA}$ 。经计算, C点正好处于 $5 \times \frac{\lambda}{4}$ 的位置, SnO_2 对此波长入射光的反射系数为极小, 响应处于峰值状态。B、D则分别处在 $4 \times \frac{\lambda}{4}$ 、 $6 \times \frac{\lambda}{4}$ 处, SnO_2 对此波长的入射光的反射系数为极大[6], 响应处于谷值状态。如果加防反射膜于二极管上, 可消除响应曲线的波动。

4、对上列三种类型的五个不同样品所作的计算表明, 激光诱导扩散制备的P-N结型光电二极管的等效“死层”宽度最小, 而且均一性较好。其他两种方法制备的光电二极管的等效“死层”厚度分散性大, 原因除了衬底材料在加工前的表面损伤程度不同外, 在加工过程中产生的表面缺陷也是主要的因素。例如 $\text{SnO}_2/n\text{-Si}$ 和 $\text{SnO}_2:\text{Sb}/n\text{-Si}$ 的等效“死层”厚度分别为 400 \AA 和 $1,200 \text{ \AA}$ 。其差异之原因可能是掺 Sb 的 SnO_2 薄膜和 Si 界面间的晶格失配比 SnO_2/Si 大。

致谢: 感谢姚杰、张坚和陈立兵同志为本文提供三种类型的光电二极管的光谱响应特性以及各种材料参数。

参 考 文 献

- [1] L. M. Terman, *Solid-state Electronic*, 2(1961), 1.
- [2] Takao Nagatomo, etc., *Japanese J. Appl. Phys.*, 6 (1979), 1103.
- [3] 姚杰, 中山大学学报(自然科学版), 1981, 4, 219.
- [4] 张苑岳、余秉才, 中山大学学报(自然科学版), 1983, 3, 99.
- [5] 姚杰, 仪器制造, 1980, 5, 38.
- [6] 曲林杰等, 物理光学, 国防工业出版社, 1980, 126~131.

The Calculation of Spectral Response in Photodiode of Surface Type

Zhang Yuanyue

Abstract

In this paper we introduce a simplified calculation of spectral response and its peak wavelength for surface type photodiode including diodes of SnO_2/Si heterojunction, surface depletion and laser inducing diffusion P-N junction. In the calculation we used depletion theory with equivalent "died layer" thickness involving surface defects caused by lattice mismatch of interface between SnO_2 or SiO_2 and Si, surface damage and contamination. It could simplify the calculation greatly and remain the accuracy either. The calculation is correspondent with experiments for five samples in three kinds of photodiode. It was pointed out that there is more sensitivity of spectral response with thinner "died layer", thicker surface depletion layer and longer lifetime of minority carriers, and there is shorter wavelength which corresponds to the peak of equal-energy spectrum with thinner "died layer" and depletion thickness, and shorter lifetime.