

P⁺N 结光电流超线性的解释

何民才

(武汉大学物理系)

大家知道, 光照射到用扩散制成的 P⁺N 结上时, 它提供的光电流由三部分组成: P⁺ 区光生电子输运到结形成的光电流 J_n , 过渡区光激发的电子和空穴分别漂向 N 区和 P⁺ 区形成的光电流 J_j 及 N 区光生空穴扩散到结产生的光电流 J_p 。所以总光电流为

$$J = J_n + J_j + J_p \quad (1)$$

我们又知道入射光子通量密度随深度呈指数衰减:

$$\phi(x) = \phi(0)e^{-\alpha x} \quad (2)$$

$\phi(0)$ 是进入 P⁺ 区表面处的光子通量密度, α 是吸收系数。一般把通量密度下降到入射量的 $1/e$ 的距离 $x_{eff} = \frac{1}{\alpha}$ 定义为基本吸收区或入射深度。因此, 随着 α 变小, 基本吸收区扩大。

α 与入射光波长关系甚为密切, 因而不同波长的光, 入射深度会相差很大。数值估算表明, 波长较短的光的入射深度基本落在 P⁺ 区和过渡区, 只有波长较长的光才能进入 N 区。P⁺ 区掺杂浓度较高, 一般都大于 10^{18} cm^{-3} 。加上这里少数载流子寿命也短, 通常光强下光生载流子浓度总比多数载流子平衡浓度小很多, 因而有较好的小信号近似, 光电流保持较好的线性。过渡区的光生电子空穴对立即被结电场分开并分别不被复合地流向 N 区和 P⁺ 区, 所以这里有最好的光电线性关系。N 区的情况就有些不同。为了尽可能提高光敏二极管的量子效率, 衬底电阻率常常选得较高。不仅多数载流子平衡浓度大大减小, 载流子寿命也随之变大, 因此一束不强的长波入射光, 也会使这里的少数载流子浓度接近多数载流子平衡浓度, 产生非线性效应。

本文公式很好地说明了超线性产生的条件及原因。首先, 可说明出现超线性现象。第二, P⁺N 结加上反向偏压, x_n 变大, 因而超线性受到抑制。第三, $\alpha L_p^0 e^{-\alpha L_p^0}$ 的影响与 αL_p^0 大小有关。若 $\alpha L_n \gg 1$ 这个因子很小。因此即使有少量短波的光进入 N 区, 由于这个条件, 超线性也是不会严重的。随着入射光波长增加, $\alpha L_p^0 \rightarrow 1$, 于是上述因素的影响迅速变大。第四, 二极管串联电阻大, 意味着衬底电阻率高, 即电子平衡浓度 n_0 小, 超线性严重。第五, 光产生率与光子通量密度成正比, 因此只有光子通量密度达到一定数量才有超线性现象发生。第六, $\frac{1}{N_t \alpha_n} = \tau_{n0}$ 是电子被复合中心俘获的极限时间。这个量代表电子补充复合中心中电子的难易程度。 τ_{n0} 大意味着复合中心的电子被大量的空穴复合之后而得不到及时补充, 空穴复合速率自然变慢, 即空穴寿命变长。上述六点不仅合理地解释了超线性现象的产生, 也为制作超线性小的光敏二极管指出了方向。