

HgCdTe 光导及扫积型器件的瞬态响应

李言谨 朱龙源 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要: 从理论和实验上分析了 HgCdTe 光导 (PC) 及扫积型 (SPRITE) 器件的瞬态衰退过程, 结果表明在高偏置电场下, 光导器件的衰退过程近似线性, 扫积型器件的衰退过程近似矩形. 由衰退过程曲线可以确定过剩载流子的双极迁移率.

关键词: 光电导, 过剩载流子, 双极迁移率.

引言

HgCdTe 光导 (PC) 器件瞬态响应比较明确的结论是随着器件偏置场升高, 过剩载流子发生扫出效应, 有效寿命减小. 在高偏置场下, 有效寿命取决于过剩载流子的渡越时间, S. P. Emmons 和 K. L. Ashley^[1]曾预言在高偏置场下, 光导器件的瞬态响应应出现斜面波形, 即衰退过程是线性的, 但未能在实验中观察到. 扫积型 (SPRITE) 器件是一种三电极结构的半导体条^[2], 它是利用过剩载流子扫出效应工作的, 有关扫积型器件的瞬态响应还未见报道.

本文从理论上计算并从实验上观察了光导及扫积型器件在均匀接受光脉冲后的瞬态响应, 分析讨论了样品长度及过剩载流子漂移长度和扩散长度对衰退过程的影响, 理论和实验比较一致. 在器件长度远远大于扩散长度时, 在高偏置场下, 光导器件的瞬态衰退过程从指数型转变成近似线性型. 扫积型器件的衰退过程则呈矩形状. 通过高偏置场下瞬态衰退过程的观测, 可以确定过剩载流子的双极迁移率.

1 理论

光电导的瞬态过程取决于光生载流子的运动过程, 忽略表面及边缘的影响后, 可以用一维模型来描述过剩载流子的运动过程, 如图 1 所示. 偏置电压加在两端电极上, 对于光导器件, 信号就从这两端电极输出. 对于扫积型器件, 信号从位于负电极端 1 处的读出电极输出.

先从唯象角度来考虑. 当脉冲光源均匀入射到光敏区域 L 上时, 产生均匀分布的过

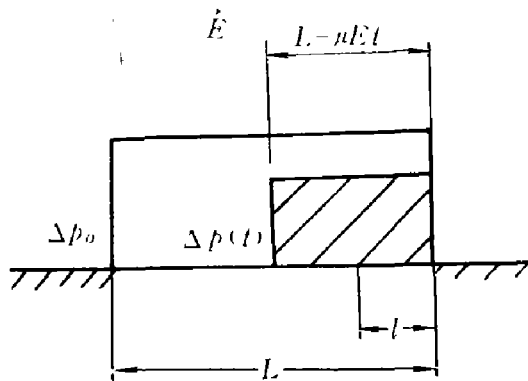


图1 过剩载流子的运动过程

Fig. 1 Moving process of excess carriers

剩载流子浓度 Δp_0 . 在电场 E 的作用下, 过剩载流子除了在体内复合外, 同时整体作漂移运动, 只有当过剩载流子在信号输出区域内才会对信号有贡献. 因此, 光导器件和扫积型器件的过剩载流子浓度 ΔP 与时间 t 的关系可分别表示为

$$\Delta p(t) = \begin{cases} \Delta p_0 \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) e^{-t/\tau}, & 0 < t < t_1 \\ 0 & t > t_1 \end{cases} \quad (1a)$$

和

$$\Delta p(t) = \begin{cases} \Delta p_0 e^{-t/\tau}, & 0 < t < t_2 \\ \Delta p_0 e^{-t/\tau} \left(1 - \frac{t-t_2}{t_3}\right), & t_2 < t < t_3 \\ 0, & t > t_3 \end{cases} \quad (1b)$$

式(1)中 $t_1 = L/\mu_a E$, $t_2 = (L-l)/\mu_a E$, $t_3 = l/\mu_a E$, L , l 分别为样品长度及读出区域长度, μ_a 为双极迁移率, E 为偏置电场. 式(1)的意义很明确, 对光导器件, 过剩载流子一方面以体寿命 τ 作指数衰减, 同时以渡越时间 t_1 作线性衰减; 对于扫积型器件, 在时间 t_2 内, 由于扫进和扫出读出区的过剩载流子数相同, 过剩载流子浓度仍以 τ 作指数衰减, 在 t_2 后, 过剩载流子只有扫出而无扫进, 过剩载流子浓度又以渡越时间 t_3 作线性衰减, 在 t_3 后, 过剩载流子被扫清. 式(1)没有考虑过剩载流子的扩散运动, 它只在样品长度远大于扩散长度时成立.

实际上, 过剩载流子除了漂移运动外, 还有扩散运动, 更准确的结果须求解含时连续性方程

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau} + D \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \mu_a E \frac{\partial \Delta p}{\partial x}. \quad (2)$$

可用分离变量方法求解方程(2). 对光导和扫积型器件的解析结果分别为

$$\Delta p(t) = \frac{4L_p^4}{L^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n\pi)^2}{\left[\left(\frac{L_e}{2L_D}\right)^2 + \left(\frac{n\pi L_D}{L}\right)^2\right]^2} \left(1 - (-1)^n \operatorname{ch} \frac{L_e L}{2L_D^2}\right) \times \tau_n e^{-t/\tau_n} \quad (3a)$$

和

$$\Delta p(t) = \frac{2L_D^3}{L^2 l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\pi}{\left[\left(\frac{L_e}{2L_D} \right)^2 + \left(\frac{n\pi L_D}{L} \right)^2 \right]^2} (1 + (-1)^n e^{L_e L / 2L_D}) \times \left\{ -\frac{n\pi}{L} + \left[\frac{Ll}{2L_D^3} \sin \frac{n\pi l}{L} + \frac{n\pi}{L} \cos \frac{n\pi l}{L} \right] e^{-L_e l / 2L_D} \right\} \times \tau_n e^{-t/\tau_n}, \quad (3b)$$

其中 $\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau} \left[1 + \left(\frac{n\pi L_D}{L} \right)^2 + \left(\frac{L_e}{2L_D} \right)^2 \right]$. 式 (3) 中 L_e 和 L_D 分别为过剩载流子的漂移长度和扩散长度. 事实上, 在偏置电场较大样品较长时, 由式 (3) 很难得到具体的数值结果. 因此, 我们采用化微分方程为差分方程的数值计算方法直接求解方程 (2), 具体过程参见附录. 图 2 和 3 给出了部分计算结果.

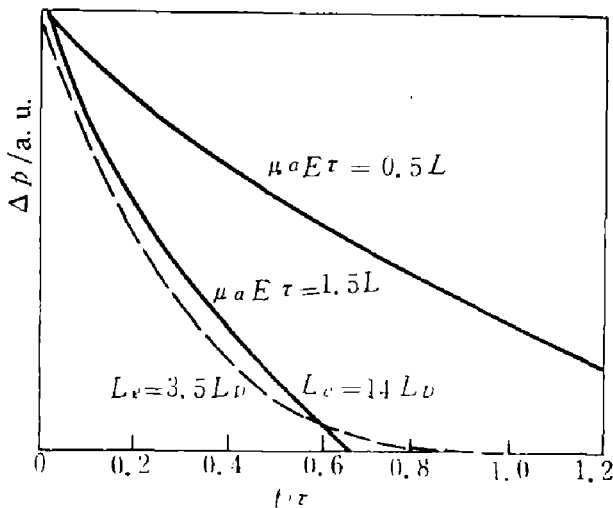


图 2 光导器件衰退过程计算结果

Fig. 2 The calculation results of PC decay

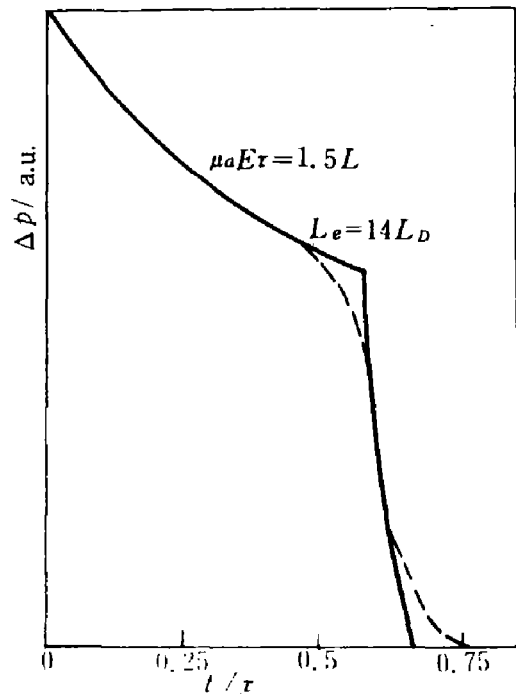


图 3 扫积型器件衰退过程计算结果

Fig. 3 The calculation results of SPRITE decay

2 实验

采用组分 $x = 0.25$ 的 N-型 HgCdTe 材料按照严格的光导探测器工艺制备样品, 样品长 $700 \mu\text{m}$, 估计是扩散长度的 10 倍以上, 两端制作欧姆接触. 在靠近端电极 $60 \mu\text{m}$ 处引入一个读出电极, 以构成扫积型器件. 样品置于杜瓦瓶中, 测量时用液氮制冷. 用 GaAs 脉冲激光均匀入射到光敏面来激发过剩载流子, 脉宽为 50 ns , 输出信号用 TEKTRONIX 7633 记忆示波器记录. 由于样品要在大电场下工作, 为了避免焦耳热的影响, 必要时采用脉冲偏置, 如图 4 所示. 偏置脉冲宽度大于过剩载流子的寿命, 同时远小于脉冲周期, 使平均功耗大大降低. 激光脉冲在偏置脉冲发生后延迟适当的时间产生.

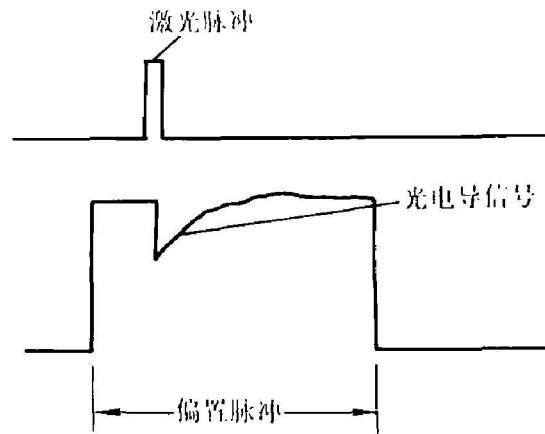


图4 脉冲偏置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pulse biasing

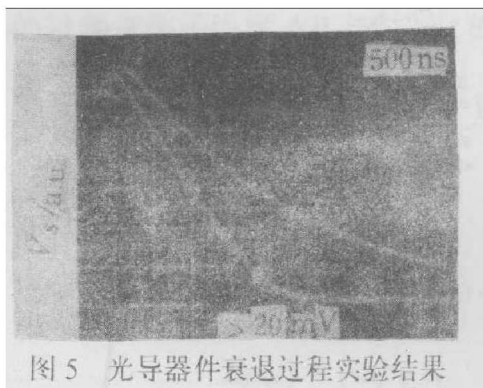


图5 光导器件衰退过程实验结果

Fig. 5 The experimental results of PC decay



图6 SPRITE 器件衰退过程实验结果

Fig. 6 The experimental results of SPRITE decay

图5和图6分别给出了对光导和扫积型器件的部分实验结果, 光导器件的偏置电场分别为45和135 V/cm, 扫积型器件的偏置电场为110 V/cm.

3 讨论

图2、5和图3、6分别是光导及扫积型器件光电导衰退过程的理论与实验结果. 为计算方便, 理论没有严格拟合实验曲线, 尽管如此, 两者还是符合得很好. 图2、3中实线是近似式(1)的计算值, 虚线为式(2)的计算值, 对应不同的扩散长度 $L_D = L/14$ 和 $L_D = L/3.5$. 对于光导器件, 在电场不大时, 过剩载流子主要在体内复合, 是以寿命为 τ 的指数过程. 当偏置电场很大时, 衰退过程则由过剩载流子的扫出过程来决定, 近似为线性衰退, 因此就有一个零点. 其零点时间为渡越时间 $t_1 = 1/\mu_a E$, 在 t_1 时, 过剩载流子被电场扫清, 基本无信号. 计算结果说明, 只有当样品长度远大于扩散长度 L_D 时才会出现明显的零点, 式(2)和(1)的结果很接近. 而当样品较短时 ($L = 3.5L_D$), 衰退过程不是线性状, 也没有明显的零点. S. P. Emmons 等在实验室中未能观察到这现象, 看来主要原因是他们当时采用的样品偏短 ($\sim 76 \mu\text{m}$), 而一般 N-型 HgCdTe 过剩载流子的扩散长度

为数十微米.

对于扫积型器件, 在高偏置场下, 衰退过程呈矩形, 实验结果中出现一个小台阶, 可能是由于光源的不均匀性或过剩载流子具有双迁移率, 这在实验上还未能证实, 但可以看出总的变化趋势和理论结果还是一致的. 当过剩载流子全部进入读出区后迅速被扫清, 衰退过程有一拐点, 拐点时间为 $t_2 = (L - l)/\mu_a E$. 该实验表明, 该器件整个扫积区的过剩载流子全部能够进入读出区, 进一步的工作说明, 能够出现这种现象的扫积型器件都具有较高的性能^[3].

从以上讨论可知, 如果测定了零点或拐点时间及所加偏置电场, 就可以求出过剩载流子的双极迁移率 μ_a . 对于本实验采用的两个样品, 用该方法得到的双极迁移率分别为 $245 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 和 $240 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

4 结语

本文从理论和实验两个方面分析讨论了 HgCdTe 光导及扫积型器件的瞬态响应过程, 得出以下几点结论.

- 4.1 在偏置电场较小时, 光导及扫积型器件的瞬态衰退过程是以体寿命为 τ 的指数过程.
- 4.2 在高偏置电场下, 光导器件的瞬态过程近似线性, 扫积型器件的瞬态过程近似矩形状 (在器件长度远大于扩散长度时).
- 4.3 从光导及扫积型器件高偏置电场下的瞬态衰退过程, 可以测定过剩载流子的双极迁移率.

附录

差分方法求解过剩载流子连续性方程, 在端电极为欧姆接触时, 过剩载流子浓度满足微分方程

$$\begin{cases} D \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \mu_a E \frac{\partial \Delta p}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau} = \frac{\partial \Delta p}{\partial t}, \\ \Delta p(x, t) = \Delta p(L, t) = 0, \\ \Delta p(x, 0) = g. \end{cases}$$

将时空坐标分割成矩形网络, 用 P_{ij} ($i\Delta x, j\Delta t$) 表示 $\Delta P(x, t)$, 上述微分方程化为差分方程

$$\begin{cases} D \frac{\Delta p_{i+1j} - 2\Delta p_{ij} + \Delta p_{i-1j}}{(\Delta x)^2} - \mu_a E \frac{\Delta p_{i+1j} - \Delta p_{ij}}{\Delta x} - \frac{\Delta p_{ij}}{\tau} = \frac{\Delta p_{ij+1} - \Delta p_{ij}}{\Delta t}, \\ \Delta p_{0j} = \Delta p_{nj} = 0, \\ \Delta p_{i0} = g. \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1, j = 0, 1, 2, \dots)$$

记 $A = a^2 \Delta t / (\Delta x)^2 - b \Delta t / \Delta x$, $B = 1 - \Delta t + b \Delta t / \Delta x - 2a^2 \Delta t / (\Delta x)^2$, $C = a^2 \Delta t / (\Delta x)^2$, $d = L_D / L$, $b = L_e / L$, 则差分方程有如下迭代关系:

$$\Delta P_{ij+1} = A \Delta P_{i+1j} + B \Delta P_{ij} + C \Delta P_{i-1j}.$$

选择适当的 Δx , Δt 使迭代式收敛, 便可求得 ΔP_{ij} . 对位置 x 积分就可求得光导器件和

扫积型器件的过剩载流子浓度随时间的关系分别为

$$\Delta p_j(j\Delta t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_{ij}, \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

和

$$\Delta p_j(j\Delta t) = \frac{1}{m} \sum_{i=2n-2n}^n \Delta p_{ij}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m = \frac{l}{\Delta x}$$

参考文献

- 1 Emmons SP, Ashley K L. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20**(4): 162
- 2 Elliott CT. *Electron. Lett.*, 1981, **17**: 312
- 3 李言谨等. **SPRITE**器件特性研究, 见第九届红外科技交流会论文集, 昆明: 昆明物理研究所, 1990

TRANSIENT RESPONSE OF HgCdTe PC AND SPRITE DETECTORS

Li Yanjin, Zhu Longyuan, Fang Jiexiong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The transient decay response of HgCdTe PC and SPRITE detectors have been calculated and observed. The results of theory and experiment are in good agreement. At high bias fields, the decay processes of PC and SPRITE detectors are with ramp and rectangular waveforms, respectively. According to the curve of decay process, the excess carrier ambipolar mobility can be determined.

Key words: photoconductors, excess carriers, ambipolar mobility.