

叠层 HgCdTe 光导器件载流子浓度分布及器件性能

胡晓宁 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

TN215

A 摘要 根据 M. A. Kinch 提出的叠层结构, 从解一维连续性方程出发, 对有叠层和无叠层器件光生载流子的浓度空间分布进行了计算和分析. 结果表明, 叠层结构相当于提供一个少数载流子存储区, 可有效抑制扫出效应, 提高体内光生载流子的平均浓度, 从而提高响应率. 实验上采用两种工艺实现了叠层结构, 并给出了器件性能的测量结果.

关键词 HgCdTe, 光导探测器, 扫出效应, 叠层结构.

引言

HgCdTe 光导探测器是目前最重要的一类红外探测器^[1]. 除材料以外, 探测器性能还受器件本身的诸多因素制约, 扫出效应是其中最重要的因素之一^[2]. 为使器件性能达到或接近背景限, 解决扫出问题关键技术之一. 欧姆接触的电极区域是载流子的高复合区, 光生载流子在这个区域高速复合, 极大地降低了载流子有效寿命^[3], 同时, 体内的非平衡载流子定态平均浓度也受到限制, 影响了器件响应率的提高. 特别是对当今小尺寸光导器件, 扫出效应成为制约器件性能的一个主要因素^[2]. M. A. Kinch 1977 年提出用一种叠层光导结构^[4]隔开光敏元与电极, 以降低电极高复合的影响.

本文根据 M. A. Kinch 提出的叠层结构, 首先从连续性方程出发, 对光导器件内光生载流子浓度的空间分布及响应率进行了计算与分析, 并在实验上摸索了叠层结构器件的工艺可行性, 给出器件的测量结果.

1 理论

1.1 公式推导

分析模型如图 1. 采用一维近似, 在加有外场 E 情况下, 稳态双极连续性方程为

$$D \frac{\partial \Delta p}{\partial x^2} - \mu E \frac{\partial \Delta p}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau} + g = 0, \quad (x_1 < x < x_2) \quad (1)$$

$$D \frac{\partial \Delta p}{\partial x^2} - \mu E \frac{\partial \Delta p}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau} = 0, \quad (0 < x < x_1) < U(x_2 < x < x_0) \quad (2)$$

式中 D 、 μ 、 τ 、 g 分别是双极扩散系数、双极迁移率、载流子寿命和光产生率. 方程的解为

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_1(x) &= A_1 e^{a_1 x} + A_2 e^{a_2 x} + g\tau, & x \in (x_1, x_2) \\ \Delta p_2(x) &= A_3 e^{a_1 x} + A_4 e^{a_2 x}, & x \in (0, x_1) \\ \Delta p_3(x) &= A_5 e^{a_1 x} + A_6 e^{a_2 x}, & x \in (x_2, x_0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 $a_{1,2} = \frac{\mu E}{2D} \pm \left[\left(\frac{\mu E}{2D} \right)^2 + \frac{1}{D\tau} \right]^{1/2} = -\frac{L_E}{2L^2 D} \pm \left[\left(\frac{L_E}{2L^2 D} \right)^2 + \frac{1}{LD^2} \right]^{1/2}$, L_D, L_E 分别为扩散长度和漂移长度.

根据边界条件及连续性条件, 可以求得各系数 $A_1 \sim A_6$ 分别为

$$A_1 = \frac{g\tau}{a_1 - a_2 f_2 e^{(a_1 - a_2)x_0} - f_1} [a_2 (e^{-a_1 x_2} e^{(a_1 - a_2)x_0} f_2 - e^{-a_1 x_1} f_1) - a_1 (e^{-a_2 x_2} f_1 - e^{-a_2 x_1} f_1)], \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{g\tau}{a_1 - a_2 f_2 e^{(a_1 - a_2)x_0} - f_1} [a_2 e^{-a_1 - a_2 x_0} f_2 (e^{-a_1 x_2} - e^{-a_1 x_1}) - a_1 (e^{-a_2 x_2} e^{(a_1 - a_2)x_0} f_2 - e^{-a_2 x_1} f_1)], \quad (5)$$

$$A_3 = A_1 - \frac{a_2 g\tau}{(a_1 - a_2) e^{a_1 x_1}}, \quad (6)$$

$$A_4 = -A_3, \quad (7)$$

$$A_5 = A_1 - \frac{a_2 g\tau}{(a_1 - a_2) e^{a_1 x_2}}, \quad (8)$$

$$A_6 = -A_5 e^{(a_1 - a_2)x_0} f_2 / f_1. \quad (9)$$

其中, $f_1 = Da_2 + s - \mu E$, $f_2 = Da_1 + s - \mu E$. 已知, $A_1 \sim A_6$, 就可以求得器件内各点的光生载流子分布.

对响应率有贡献的是器件内光生载流子平均浓度

$$\begin{aligned} \overline{\Delta P} &= \frac{1}{x_0} \left[\frac{A_3}{a_1} (e^{a_1 x_1} - 1) + \frac{A_4}{a_2} (e^{a_2 x_1} - 1) + g\tau (x_2 - x_1) + \frac{A_1}{a_1} (e^{a_1 x_2} - e^{a_2 x_1}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2}{a_2} (e^{a_2 x_2} - e^{a_2 x_1}) + \frac{A_5}{a_1} (e^{a_1 x_0} - e^{a_1 x_2}) + \frac{A_6}{a_2} (e^{a_2 x_0} - e^{a_2 x_2}) \right], \quad (10) \end{aligned}$$

响应率为

$$R = \frac{V_i}{p} = \frac{\lambda}{hv} \cdot \frac{(\mu_n - \mu_p) q E}{(x_2 - x_1)} r_D \left(\frac{\Delta P}{g} \right). \quad (11)$$

1.2 理论计算

我们计算了如图 2 所示两种结构 A 和 B 的载流子浓度分布、平均载流子浓度随电场变化以及响应率随电场变化曲线, 结果分别如图 3~5 所示.

从图 3 可以看出, 叠层结构对载流子起了滞流作用, 为少数提供了一个存储区, 使体内载流子浓度大大提高. 图 4 表明, 随着电场的增加, 平均载流子浓度降低, 即载流子包被逐渐

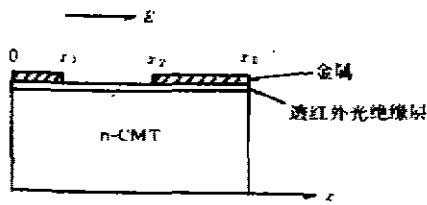


图 1 叠层结构剖面图
Fig. 1 Cross-section of the overlap structure

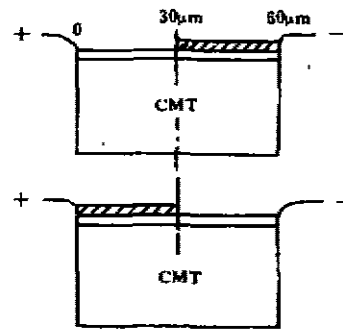


图 2 A、B 结构剖面图
Fig. 2 Cross-section of structures A and B

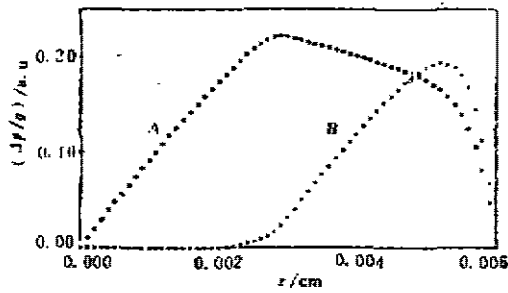


图 3 两种结构的载流子浓度分布
A, 30 μm 叠层, B, 无叠层
Fig. 3 Carrier concentration distributions of two structures
A, 30 μm overlap, B, no overlap

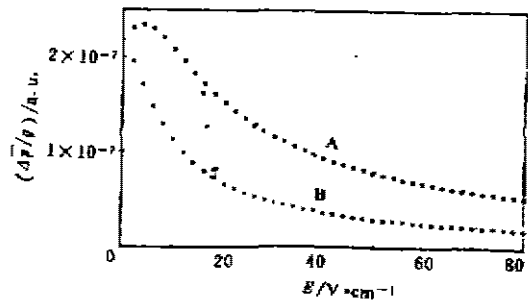


图 4 平均载流子浓度随电场变化
Fig. 4 Average carrier concentration vs field
A, 30 μm overlap, B, no overlap

扫出. 图 5 表明, 随着电场的增加, R_r 趋于饱和, 但 A 比 B 后饱和, 且 $R_r(A) > R_r(B)$. 对 B 结构, 载流子向负电极漂移时, 迅速达到电极处被电极复合, 所以在较小的电下载流子就被扫出. 而 A 结果, 载流子包受到 30 μm 的掩蔽, 相当于建立了 30 μm 的载流子存储区, 故在较小电场下仍有体内复合而未被扫出. 只有当电场大到使漂移长度大于光产生区域到电极的距离, R_r 才出现饱和. 从上面的理论计算来看, 叠层结构可以大大提高器件的响应率.

2 样品制备

按照常规多元光导工艺流片, 中间添加一

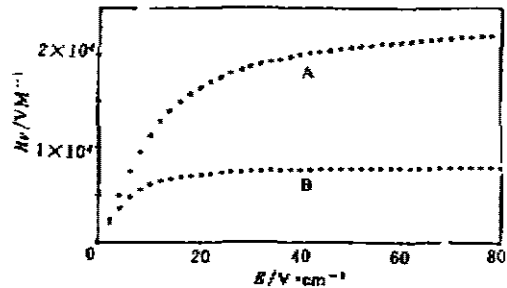


图 5 响应率随电场变化
A, 30 μm 叠层, B, 无叠层
Fig. 5 Responsivity vs field.
A, 30 μm overlap, B, no overlap

道工序淀积或涂敷一层透红外绝缘层. 本文采用了涂敷聚酰亚胺层和离子束溅射 ZnS 两种工艺做介质层, 这是制备叠层器件的关键工艺.

3 实验结果与讨论

图 6 为不对称叠层电极正反向光电导瞬态衰退过程, 它直接反映了载流子存储区对载流子的滞留作用. 叠层结构不对称电极正反向信号比较如图 7 所示.

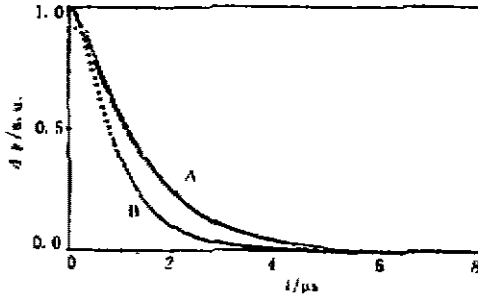


图 6 不同结构的光电导衰退曲线
Fig. 6 Experimental results of PC decay for different structure

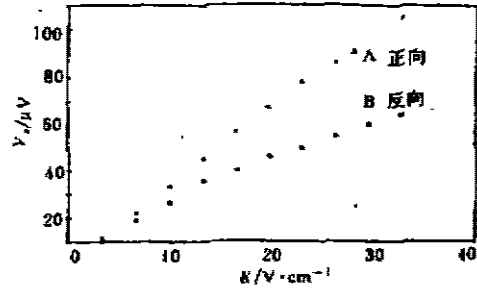


图 7 PI-10 号器件的信号电压随电场变化曲线
Fig. 7 Signal voltage vs field for device No. PI-10

我们认为: (1) 叠层结构是提高小尺寸光导器件性能使其达到或接近背景限的关键技术之一, 如果材料本身性能参数较差, 寿命较短, 表面复合又大, 则载流子将很难扫出, 叠层结构体现不出其优点. (2) 上述的一切讨论都基于一点, 即小注入条件. 如果是强注入, 双极扩散系数和双极迁移率将不再近似等于少子扩散系数和少子迁移率. 由 Rittner 理论^[3]可知

$$D_n = \frac{(n+p)}{n/D_n + p/D_p} = \frac{(n_0 + p_0 + 2\Delta p)}{(n_0 + \Delta p)/D_n + (p_0 + \Delta p)/D_p}, \quad (12)$$

$$\mu_n = \frac{(n-p)}{n/\mu_n + p/\mu_p} = \frac{(n_0 - p_0)}{(n_0 + \Delta p)/\mu_n + (p_0 + \Delta p)/\mu_p}. \quad (13)$$

当 $\Delta p \sim n_0$ 或 $\Delta p \gg n_0$ 时, μ_n 大大减小, 载流子将很难扫出甚至无扫出. 在这种情况下, 叠层结构也不显优势^[3], 相反, 由于它增加了暗电导区域, 对光生载流子无贡献, 使得它的性能低于一般光导器件. 叠层区域越长, 平均光电导越小.

4 结论

4.1 当光导器件在较大的电场偏置下, 载流子漂移长度大于器件光敏区边缘到电极的距离, 或者载流子扩散长度大于光生载流子产生区边缘到电极的距离时, 光生载流子发生扫出, 器件有效寿命下降, 响应率饱和. 理论计算表明, 在小注入条件下, 若采用叠层电极结构, 隔开光照区与电极区, 提供一个载流子存储区, 可以提高载流子定态平均浓度, 从而提高器件响应率. 实验结果证明了这一点.

4.2 如果器件工作在强注入环境下, 将不发生扫出, 叠层结构不显示优越性, 对用于

10. $6\mu\text{mCO}_2$ 激光探测的 HgCdTe 光导器件, 不必采用叠层结构.

参考文献

- 1 Jozwikowska A, Jozwikowski K, Rogalski A. *Infrared Phys.*, 1991, **31**(6), 543
- 2 Broudy R M, Mazurezyk V J. *Semimetals and Semiconductors*, 1981, **18**, 157
- 3 Rittner E S. *Photoconductor Conference*, New York, H. Wiley, 1956; 215.
- 4 Kinch M A, *Semimetals and Semiconductors*, 1981, **18**, 188
- 5 Fenigstein A, Schacham S E, Finkman E. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1992, **B10**(4), 1611

CARRIER CONCENTRATION DISTRIBUTION AND PERFORMANCE OF OVERLAP PHOTOCONDUCTIVE DETECTOR

Hu Xiaoning, Fang Jiexiong

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

Abstract Carrier concentration distribution of overlap and non-overlap photoconductive detectors was calculated and analyzed by solving the one-dimensional ambipolar transport equation, according to the overlap structure proposed by M. A. Kinch. The results show that the overlap structure offers a region storing the minority carriers, which suppresses the sweepout and increases the average photo-induced carrier concentration, thus improving the responsivity. The overlap structure was implemented by means of two kinds of technologies, and the measured data were given in this paper.

Key words HgCdTe, photoconductor, sweepout, overlap structure.