

文章编号:1001-9014(2005)02-0140-03

变磁场 $I-V$ 法对碲镉汞光伏器件少子扩散特性的研究

贾嘉, 陈新禹, 李向阳, 龚海梅

(中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 零偏压电阻-面积乘积 (R_0A) 和反向饱和电流密度 J_0 是决定光电二极管性能的重要参数. 提出了一种对碲镉汞 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) 光伏器件的少子扩散特性进行研究的有効方法. 利用变磁场下的电流-电压 ($I-V$) 测试, 得到了组分 x 在 0.5 与 0.6 之间的器件 R_0A 和 J_0 随磁场强度 B 变化的函数关系. 由实验结果估算得到了室温工作的短波红外 (SWIR) 碲镉汞光伏器件的少子扩散长度. 其数值与用激光诱导电流 (LBIC) 方法得到的相一致.

关键词: 变磁场; $I-V$ 测试; 短波红外; 碲镉汞光伏器件; 少子扩散长度

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

STUDY ON THE MINORITY CARRIER DIFFUSION CHARACTERISTIC OF HgCdTe DIODES BY $I-V$ MEASUREMENT IN A VARIATIONAL MAGNETIC FIELD

JIA Jia, CHEN Xin-Yu, LI Xiang-Yang, GONG Hai-Mei

(State Key Laboratory of Sensing technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The zero-bias resistance area product (R_0A) and the saturation current density J_0 are both key parameters to give an indication of photodiode performance. In this study, an effectual experimental method to study the minority carrier diffusion characteristics of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photodiodes was presented. By $I-V$ tests in a variational magnetic field B , R_0A and J_0 measurements were carried out as a function of B in the alloy composition range $0.5 < x < 0.6$. Based on the test results, the minority carrier diffusion length of short wavelength infrared (SWIR) HgCdTe photodiodes operating at room temperature was calculated. The value is in agreement with the scale measured by laser beam induced current (LBIC) method.

Key words: variational magnetic field; $I-V$ test, SWIR; HgCdTe photodiodes; minority carrier diffusion length

引言

碲镉汞 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) 三元系化合物属于窄禁带半导体材料, 广泛应用于研制高性能红外探测器, 通过对组分 x 的控制, 可工作于 $1 \sim 20 \mu\text{m}$ 红外波段的探测. 短波碲镉汞探测器可用于接受海洋表面和云层顶部的反射阳光, 对气象预报和环境监测起到了重要作用^[1].

由于短波碲镉汞光伏型探测器的阻抗较高, 在室温下即可获得较高的探测率, 这给器件封装与使用带来了极大的便利. 因此, 室温短波碲镉汞焦平面技术在军事与航天工业上的应用越来越广泛. 因此研究碲镉汞光伏器件的少子扩散特性具有很大的理

论价值与现实意义. 本文利用变磁场电流-电压 ($I-V$) 谱的方法, 对短波 $n^+ \text{-on-p}$ 型碲镉汞光伏器件的少子扩散特性进行了研究.

1 实验原理

利用变磁场研究 p 型碲镉汞的少子扩散特性是基于简化的单边扩散模型, 即在 $n^+ \text{-on-p}$ 结中 p 型衬底一侧的电流起到了主要作用. 在热平衡条件下, 通过碲镉汞光伏器件的电流主要由 n 区和 p 区的扩散电流、势垒区的产生-复合 ($g-r$) 电流、隧道电流和表面漏电流等组成. 在高温区室温附近, 碲镉汞器件主要是扩散电流限制. 而在 $n^+ \text{-on-p}$ 结构中, 由于施主浓度 $N_D \gg$ 受主浓度 N_A , 因此在扩散机制中主要

收稿日期: 2004-03-08, 修回日期: 2004-08-31

基金项目: 中国科学院国防科技创新基金 (cxjj-72) 资助项目

作者简介: 贾嘉 (1976-), 男, 山东安邱人, 助理研究员, 硕士, 主要从事薄膜工艺和红外探测器的研究.

Received date: 2004-03-08, revised date: 2004-08-31

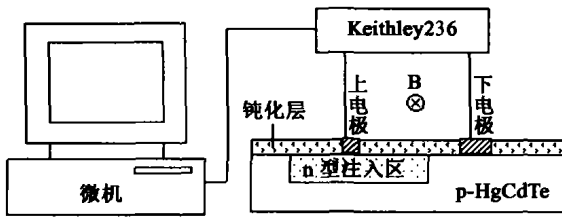
图1 变磁场 I - V 谱的测试原理图

Fig. 1 Schematic diagram of I - V test in a variational magnetic field

又是起源于 p 型衬底的电子电流起作用^[2].

如果把一个碲镉汞光伏器件置于磁场后,使得它的电流方向和磁场方向垂直,如图1所示.这样就会产生一个 Lorentz 力,同时影响电子和空穴的运动方向.由于碲镉汞材料的电子和空穴迁移率比很高,通过结区的电子和空穴电流密度分量比发生了变化,从而影响器件的零偏压电阻-面积乘积 (R_0A) 值.利用一阶近似,根据 R. N. Zitter^[3] 的分析,在磁场强度 B 下的载流子迁移率 μ^* 和扩散系数 D^* 应被修正为

$$\mu^* = \frac{\mu}{1 + \mu^2 B^2}, D^* = \frac{D}{1 + \mu^2 B^2}. \quad (1)$$

其中, μ 和 D 分别为零磁场下的载流子迁移率和扩散系数.

对于大组分的短波碲镉汞光伏常规器件来说,满足少子扩散长度比耗尽区宽度(几微米)大得多的近似条件,因此在磁场下的空穴和电子饱和电流密度可以分别表示为^[4]

$$J_{op}^* = \frac{J_{op}}{1 + \mu_h^2 B^2} = q \frac{D_h}{L_h} \cdot \frac{n_i^2}{N_D(x_n)} \cdot \frac{1}{1 + \mu_h^2 B^2}, \quad (2)$$

$$J_{on}^* = \frac{J_{on}}{1 + \mu_e^2 B^2} = q \frac{D_e}{L_e} \cdot \frac{n_i^2}{N_A} \cdot \frac{1}{1 + \mu_e^2 B^2}. \quad (3)$$

其中, q 为电子电量; B 为磁场强度; n_i 为本征载流子浓度; J_{op} 和 J_{on} 分别为 $B=0$ 时的空穴和电子饱和电流密度; N_A 是 p 型衬底中的受主浓度; $N_D(x_n)$ 是结区 n 型一侧耗尽区边界处的施主浓度; L_h 和 L_e 分别为零磁场下空穴和电子的扩散长度, μ_h , μ_e 和 D_h , D_e 则是对应的迁移率与扩散系数.由于碲镉汞材料的电子迁移率比空穴的要大得多,所以在 10^{-1} Tesla 的磁场下,与电子的饱和电流密度的变化相比,空穴的漂移几乎没有改变,可以认为空穴的饱和电流密度近似的是个常数.则磁场下总的饱和电流密度有

$$J_0(B) = J_{on}^* + J_{op}^* \approx \frac{J_{on}}{1 + \mu_e^2 B^2} + J_{op}. \quad (4)$$

因此,测量总的饱和电流密度 J_0 随磁场变化的

情况,从其中的变化分量和恒定分量的比率,就可以推算 J_{on} 和 J_{op} 的数值.再利用式(3)就可以获得 p 型衬底中的碲镉汞少子扩散长度 L_e .

2 实验

2.1 样品制备

实验所用的短波碲镉汞光伏器件样品均采用通常平面光伏器件工艺形成的 n^+ -on- p 型碲镉汞芯片:即在区熔掺杂生长的大组分 p 型材料上,经生长 ZnS 阻挡层和注入硼离子后,再在光敏区外的 n 型注入中和 p 型衬底材料上分别电极引出进行测试,如图2所示.实验中使用的样品编号与材料参数见表1所列.

2.2 实验结果与讨论

实验中,器件的反向饱和电流 I_0 (定义为器件在反向偏压为 0.5V 时输出的电流值)和零偏压电阻 R_0 的测量是通过测量器件的 I - V 特性得到的.测试是由一台微机控制下的 Keithley236 型可编程 I - V 测试仪完成的,如图1所示.器件的反向饱和电流值 I_0 可以直接读出, R_0 是利用零点附近测量数值的一阶微商并求倒数后得到的结果.图3是1#样品 R_0A 随磁场强度 B 变化的关系图.

表1 实验中所使用的体材料样品编号及材料参数

Table 1 Sample ID and its material data used in this study

材料编号	1#	2#	3#
组分	0.59	0.51	0.50
最大透射率 $T_{max}/(\%)$	57	56	56
室温电阻率 $\rho_{300K}/(\Omega \cdot \text{cm})$	96.6	29.3	17.8
室温空穴浓度 $P_{300K}/(\text{cm}^{-3})$	5.53×10^{13}	1.26×10^{15}	8.50×10^{15}
室温迁移率 $\mu_{300K}/(\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1})$	1220	170	44
截止波长 $\lambda_{c300K}/(\mu\text{m})$	1.68	1.73	1.74
少子寿命 $\tau_{e300K}/(\text{ns})$	12	92	380

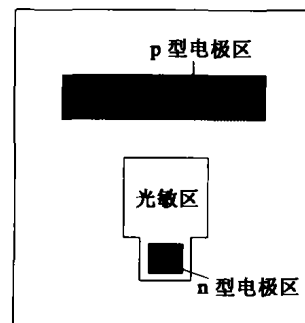


图2 芯片结构示意图

Fig. 2 Plan layout of the samples

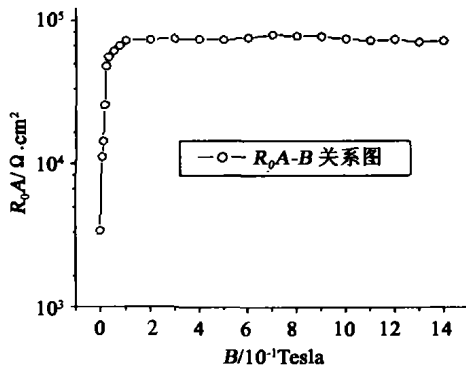


图3 1# 样品 R_0A 随磁场 B 变化的关系图
Fig.3 Magnetic field dependence of R_0A (sample 1#)

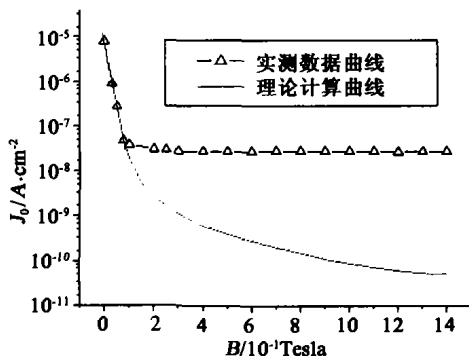


图4 2# 样品 J_0 随磁场变化的关系图
Fig.4 Magnetic field dependence of J_0 (sample 2#)

由测量器件的 $I-V$ 特性,我们还得到了反向饱和电流密度 J_0 ($V = -0.5V$) 随磁场变化的关系.图4 即是2#样品的反向饱和电流密度 J_0 随磁场变化的关系曲线,图中我们还给出了该组分 ($x \approx 0.5$) 器件 J_0-B 关系的理论曲线.由于碲镉汞材料的有些参数,如少数寿命和少数迁移率,它们的离散性特别大,理论计算中我们选取了较为适中的数值,例如:n区的少数(空穴)的寿命 τ_h 取为 $0.1\mu s$,迁移率 μ_h 取为 $300\text{cm}^2/\text{Vs}$.式(3)和式(4)两式中的其它参数采用经验公式^[5,6]值加以确定.从图4中我们可以看到:器件在在弱磁场 ($B < 1 \times 10^{-1}\text{Tesla}$) 中, J_0 随磁场变化得十分迅速,且与理论值符合地较好;磁场继续增大, J_0 则几乎不随磁场变化而迅速达到饱和,饱和速度比理论值快得多,这一方面是因为理论计算中我们假设了寿命和迁移率等参数值都不随磁场的强度而改变,另一方面是因为 $I-V$ 测量中的背景、温度或是视场角与理论计算的条件存在着一定的差异^[5].其值比我们用激光诱导电流(LBIC)方法得到的结果略小一些^[7].分别用这两种不同方法求得的p型碲镉汞少数扩散长度 L_e 值,见表2.

表2 用两种不同方法得到的p型碲镉汞 L_e 数值比较
Table 2 Comparison of L_e in p-HgCdTe between the data measured in variational magnetic field and with LBIC method

$L_e/\mu\text{m}$	变磁场法	LBIC法
1#	20	25
2#	13	15
3#	8	12

3 结语

1. 为研究碲镉汞短波光伏器件的少数扩散特性提供了一种较为有效的方法——变磁场电流-电压($I-V$)特性谱.利用变磁场下的 $I-V$ 测试,得到了器件 R_0A 和 J_0 随磁场强度 B 变化的关系,进而可以对器件的少数扩散长度进行估算.

2. 利用变磁场 $I-V$ 特性谱的实验,并基于简化的单边扩散模型得到:在常规的材料参数条件下,室温下在 $n^+ \text{-on-p}$ 型短波(组分 $x \approx 0.5 \sim 0.6$) 碲镉汞光伏器件中,其少数扩散长度约为二十微米左右.

3. 采用变磁场 $I-V$ 谱和 LBIC 方法测量了同一批短波碲镉汞光伏器件在室温下的少数扩散长度值,两者符合得很好.但对于不同波段的碲镉汞器件以及其他不同带隙的半导体材料,变磁场 $I-V$ 谱的方法是否适用需要进一步用实验验证.

REFERENCES

- [1] QIAO Hui, JIA Jia, CHEN Xin-Yu, *et al.* Influence of 1MeV electron irradiation on HgCdTe photoconductor detectors [J]. *I. Infrared Millim Waves* (乔辉,贾嘉,陈新禹,等. 1MeV 电子辐照对碲镉汞中波光导器件的影响. 红外与毫米波学报), 2004, 23(3):172—175.
- [2] TANG Ding-Yuan, TONG Fei-Ming. *Infrared Detectors of narrow-gap Semiconductors* [M]. Beijing: The research and evolvement of semiconductor devices II, Science Press (汤定元,童斐明. 窄禁带半导体红外探测器. 北京:半导体器件研究与进展 II, 科学出版社), 1991:1—107.
- [3] Zitter R N. Role of traps in photoelectromagnetic and photoconductive effects [J]. *Phys. Rev.*, 1958, 12(3):852—855.
- [4] Schacham S E, Finkman E. Magnetic field effect on the ROA product of HgCdTe diodes [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1989, 7(2):387—390.
- [5] Rosbeck J P, Starr RE, Price S L, *et al.* Background and temperature dependent current-voltage characteristics of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photodiodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, 53(9):6430—6440.
- [6] Hansen G L, Schmit J L. Calculation of intrinsic carrier concentration in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, 54(3):1639—1640.
- [7] JIA Jia, CHEN Gui-Bin, GONG Hai-Mei, *et al.* Study on the junctions of SWIR HgCdTe photodiodes at room temperature with laser beam induced current [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (贾嘉,陈贵宾,龚海梅,等. 室温短波碲镉汞结区的 LBIC 方法研究. 红外与毫米波学报), 2005, 24(1):11—14.