

弱 p 型碲镉汞材料和陷阱模式光导探测器

张可锋 林杏潮 张莉萍 王 仍 焦翠灵 陆 液 王妮丽 李向阳

(中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要 窄禁带碲镉汞(HgCdTe)为电子和空穴混合导电的多载流子体系材料,特别是对于弱 p 型材料,由于电子和空穴的迁移率相差大约两个数量级,更容易受到少数载流子电子的干扰,因此单一磁场的霍尔测试无法区分迁移率较低性能较差的 n 型材料和 p 型材料。通过变温变磁场的霍尔测试对两种碲镉汞材料的磁输运特性进行了测试区分。另外对由弱 p 型材料制备的陷阱模式光导器件的工作机理进行了初步分析,解释了这种器件相对于传统器件所表现出的独特优势。

关键词 探测器;霍尔测量;HgCdTe;磁输运;陷阱模式

中图分类号 TN21 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP48.060401

Slight p-Type HgCdTe and Trapping-Mode Photoconductive HgCdTe Detectors

Zhang Kefeng Lin Xingchao Zhang Liping Wang Reng Jiao Cuiling
Lu Ye Wang Nili Li Xiangyang

(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Very-narrow-gap bulk-grown HgCdTe single crystals are multicarrier semiconductor system material, since the multiple electrons and holes species frequently contribute to the conduction. Especially for the slight p-type HgCdTe single crystals, the conventional measurements of a single magnetic field can lead to erroneous conclusions because of the large ratio of the electron mobility to hole mobility. The n-type crystals with poor mobility and slight p-type crystals with excellent electrical properties cannot be distinguished by the conventional single-field data. Variable-magnetic-field Hall measurements are performed on bulk-grown HgCdTe single crystals at various temperatures. From the results, the variable-magnetic-field Hall measurements are found to be a suitable tool for differentiation electrical characterization of the two type HgCdTe single crystals. The operating principle of the trapping-mode photoconductive HgCdTe detectors is investigated.

Key words detectors; Hall measurements; HgCdTe; magneto-transport; trapping-mode

OCIS codes 040.3060; 160.1890; 250.0040; 160.5140

1 引 言

利用常规的磁输运测量获取半导体材料的各项电学参数,一直是表征半导体材料性能的重要手段。对于窄禁带的碲镉汞半导体材料,由于热处理、表面氧化和晶片的表面处理等工艺过程中,容易在晶片中间形成夹心层和表面反型层,形成多种载流子共同参与导电的材料体系。对于多载流子共同参与导电的材料体系,常规的磁输运测量结果已经不能准确地表征其电学性质。如对于 p 型碲镉汞材料,77 K 时迁移率 $\mu_p \approx 1 \times 10^3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,而 $\mu_n \approx 2 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, $\mu_n/\mu_p \approx 10^2$,空穴和电子的迁移率相差大约两个数量级,在采用常规磁输运测量时,测试结果往往显示为性能很差的 n 型材料(低迁移率),而实际是性能优良的 p 型材料,因此测试结果变得很不可靠,甚至得到错误的结果^[1~6]。近几年,变磁场的磁输运测量越来越受到人们

收稿日期: 2010-08-23; **收到修改稿日期:** 2010-11-08; **网络出版日期:** 2011-04-25

基金项目: 上海市自然科学基金(10ZR1434500)资助课题。

作者简介: 张可锋(1978—),男,博士,助理研究员,主要从事红外材料及探测器等方面的研究。

E-mail: zhang78412@hotmail.com

的重视。由于不同的载流子具有不同的迁移率,它们在不同的磁场下对电导有不同的贡献,通过在不同温度下,分析材料的迁移率与磁场强度的依赖关系,可以获得两种样品在导电过程中占主导地位是电子还是空穴,从而分析是性能优良的弱 p 型材料还是性能很差的 n 型材料。

几年前,在制备光导型碲镉汞探测器的过程中,注意到在采用性能很差的 n 型材料做流片实验时,经常会得到性能很好的器件,为此进行了很多的实验和研究,想更加深入地理解和解释这一反常现象。但由于之前没有相关的文献报道,对这种器件的工作机理的理论研究一直比较肤浅,经过最近一年专项的研究,逐渐意识到,所使用的所谓的性能很差的 n 型材料,实际为性能优良的 p 型材料。为了区分与高掺杂和未进行热处理的汞空位型强 p 型材料,本文称这类材料为弱 p 型材料。与此同时,2009 年 Honeywell、Raytheon 等著名的 HgCdTe 材料和焦平面器件制造商,在碲镉汞 50 周年的 SPIE 会议上,同时报道了采用弱 p 型 HgCdTe 材料所制备的光导器件,其在功耗和响应率等探测器关键性能方面表现出相当明显的优势。他们同时提出了“陷阱模式”碲镉汞光导器件的概念^[7,8]。本文详细论述了碲镉汞弱 p 型材料的磁输运特性及筛选方法,并对陷阱模式碲镉汞光导器件的工作机理进行了初步研究。

2 弱 P 型碲镉汞材料的磁输运特性

图 1 给出了弱 p 型材料和性能较差的 n 型材料的迁移率随温度的变化趋势,两种材料表现出了明显的区别。由图 1(a)可知,弱 p 型材料的类型随温度的变化会出现转型,高温时表现为 n 型材料,当温度低于 250 K 时转变为 p 型材料。对于由多种载流子共同参与导电的弱 p 型材料,在高温的导电机理主要是本征载流子起主导作用,由于电子的迁移率远高于空穴的迁移率,故材料以电子导电为主,材料表现为 n 型材料;随着温度的降低,电子的浓度随本征激发载流子浓度的降低而降低,材料中空穴参与导电的比例逐步增强,并最终表现为 p 型材料。

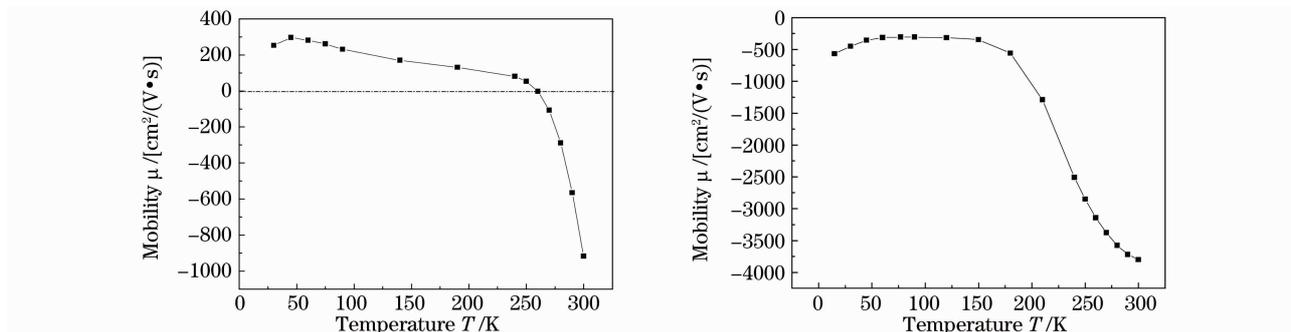


图 1 弱 p 型 HgCdTe 材料(a)与性能较差的 n 型 HgCdTe 材料(b)的迁移率随温度的变化

Fig. 1 Measured mobility versus temperature of slightly p-type HgCdTe (a) and n-type HgCdTe with poor mobility (b)

除上述的弱 p 型材料外,还有一类弱 p 型材料虽然其迁移率随着温度的降低也会出现反型,但是出现反型的温度点要低很多,大约在温度降低到 150 K 后才能由 n 型转变为 p 型材料^[9]。图 2 给出了这类弱 p 型材料的迁移率在不同温度下随磁场的变化趋势。在低温端 (77 K),材料表现为 p 型材料,迁移率随磁场的增大而增大。分析原因是由于在低温端由热本征激发的电子浓度相对于高温端已经明显降低,而且随着磁场的增大,电子相对于空穴的导电效应逐渐被抑制,从而使空穴参与导电的比例增大,最终使迁移率增大。150 K 时,随着磁场的增大,电子的导电效应逐渐被抑制的现象表现得更加明显,因为此时电子在导电效应中占主导地位,这个样品仍然表现为 n 型样品,但已经不像高温那样占据绝对的优势,所以当磁场变大时,电子的导电效应逐渐被抑制,

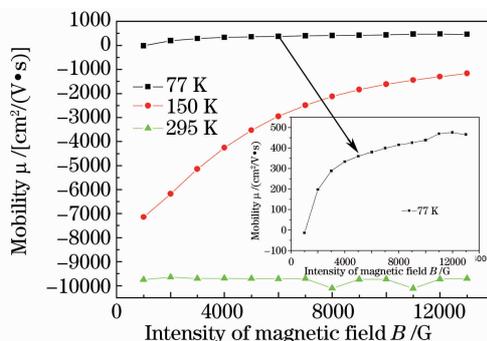


图 2 弱 p 型 HgCdTe 材料的迁移率在不同温度下随磁场的变化

Fig. 2 Measured mobility versus magnetic field for a slight p-type HgCdTe sample at temperatures of 77 K, 150 K and 295 K, respectively

迁移率逐渐降低,逐渐向 p 型样品方向转化。当处于高温端时(295 K),由于热激发的本征载流子起主导作用,电子在导电过程中占据绝对优势,空穴所占的比例可忽略不计,因此随着磁场的增大,迁移率基本保持不变。

通过前面两个实验说明,采用变温变磁场的磁输运测试手段,可以准确地区分弱 p 型材料和性能较差的 n 型材料。在低温端和变磁场时,弱 p 型材料会出现从 n 型材料向 p 型材料的转化。

3 陷阱模式碲镉汞光导器件的工作机理

在碲镉汞光导器件的研究过程中发现了一个有意思的现象,就是采用前面所述的弱 p 型材料制备的光导器件,其性能要明显地高于传统的采用 n 型材料制备的光导器件,这种反常的现象可以通过陷阱效应加以解释。

如果少数(空穴)在被扫到阴极之前被陷阱捕获,电子电流会持续更长一段时间,这样就增大了光导增益。如果不存在陷阱效应,扫出型光导器件的增益理论值为

$$G_{pc} = (b + 1)/2, \quad (1)$$

式中 $b = \mu_n/\mu_p$, 即电子空穴迁移率之比。对于 n 型碲镉汞材料, 77 K 时 $\mu_n \approx 2 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, $\mu_p \approx 1 \times 10^3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 所以, b 约为 200, 光导增益最大值仅为 100。然而, 某些光导器件的增益却达 300 甚至更高。对于有效寿命的测量结果表明它比计算出的时间更长:

$$\tau_s = L/\mu_p E. \quad (2)$$

也就是说空穴向负极的运动过程被延迟,这可以用下面的模型对其进行定性的解释。

如果制备器件的材料为 p 型材料,器件的表面和背面都有阳极氧化膜和 n 型接触电极,这样就会在 p 型材料表面出现一层 n 型反型层,如图 3 所示。当材料吸收入射光而产生电子-空穴对时,电子更容易扩散到 n 型表面并流入正极,但是空穴则会被 p 型材料捕获。扫出效应理论的边界条件是电子很容易地进出两个电极并且在电极处立即复合。但是,陷阱模式采用了不同的边界条件,由于势垒的存在,束缚了空穴往负极的运动。要指出的是,这里的陷阱模式不同于传统光导器件中点缺陷对载流子的微观俘获行为,而是发生在材料中的一个宏观区域。

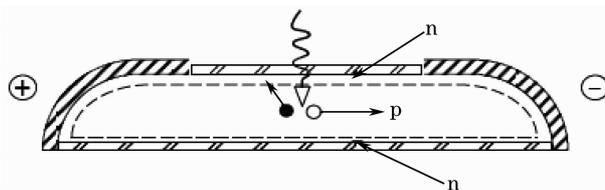


图 3 弱 p 型 HgCdTe 材料制备的光导探测器的截面图
Fig. 3 Cross section of slightly p-type HgCdTe photoductor

异质结界面陷阱探测器在结构上类似于传统的光导探测器,但在响应性能上却有显著的提高。图 4 为雷神公司 2009 年报道的陷阱模式的光导探测器和传统的光导器件^[8], 在温度为 80K 和背景为 $10^{16} \text{ photon}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 时的性能对比结果。对于一个 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 的单元器件, 偏压功耗在 0.1~1 mW 的情况下, 陷阱模式的探测器在响应率上比传统光导探测器高出不只一个量级。更重要的是, 陷阱模式的探

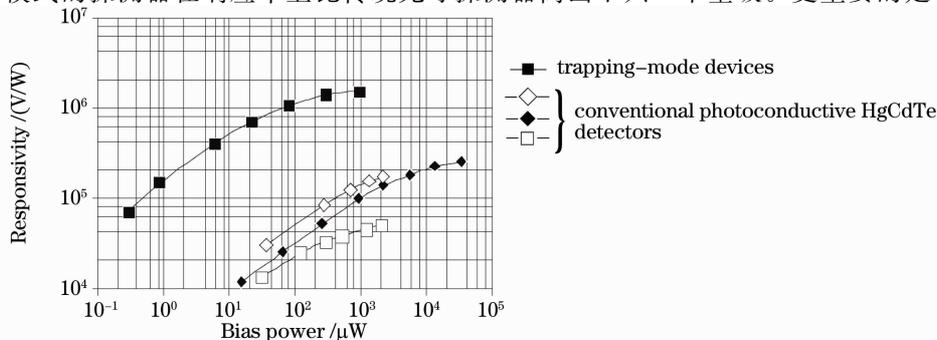


图 4 陷阱模式探测器与传统的光导探测器在 $12 \mu\text{m}$ 响应光谱方面的对比
Fig. 4 Comparison of the responsivity of conventional photoconductive HgCdTe detectors with trapping-mode devices at wavelength of $12 \mu\text{m}$

测器达到 10^5 V/W 的响应率比传统的光导探测器所需要的偏压功耗低两个量级,有利于减少大规模多元阵列的功耗。

4 结 论

采用变温变磁场的磁输运技术,对弱 p 型 HgCdTe 材料和低迁移率性能较差的 n 型材料进行了测试分析。从测试结果可以得出,随着温度的降低和磁场的增大,电子的导电能力将被逐渐抑制,弱 p 型 HgCdTe 材料的迁移率将出现从 n 型到 p 型样品的转化。因此,变温变磁场的磁输运技术可以比较容易地区分两类材料。另外,采用电荷分离效应定性分析了。由弱 p 型材料制备的陷阱模式 HgCdTe 光导器件,在响应率和功耗等方面所表现出的独特优势,为进一步提高单元和小阵列 HgCdTe 光导器件的性能提供参考。

参 考 文 献

- 1 J. R. Meyer, C. A. Hoffman, F. J. Bartoli *et al.*. Advanced magneto-transport characterization of LPE-grown $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ by quantitative mobility spectrum analysis[J]. *J. Electron. Mater.*, 1996, **25**(8): 1157~1164
- 2 J. Antorszewski, D. J. Seymour, L. Faraone *et al.*. Magneto-transport characterization using quantitative mobility spectrum analysis[J]. *J. Electron. Mater.*, 1995, **24**(9): 1255~1262
- 3 L. F. Lou, W. H. Frye. Hall effect and resistivity in liquid-phase-epitaxial layers of HgCdTe[J]. *J. Appl. Phys.*, 1984, **56**(8): 2253~2267
- 4 P. Moravec, R. Grill, J. France. Galvanomagnetic and thermoelectric properties of P-HgCdTe[J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2001, **16**(1): 7~13
- 5 S. Kialgamdchai, M. Myronov, O. A. Mironov. Mobility spectrum computational analysis using a maximum entropy approach[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(3): 1~9
- 6 Li Li, Lu Qisheng. Numerical simulation of dynamic response of PC-type HgCdTe detector irradiated by in-band and out-of-band laser beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1952~1958
李 莉, 陆启生. 光导型 HgCdTe 光电探测器对双波段组合激光辐照动态响应的数值模拟[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1952~1958
- 7 Joe Schmit, Paul Kruse, Ernie Stelzer. Development of a 0.1 eV bandgap semiconductor at the honeywell research center [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 7298R-1
- 8 P. R. Bratt, S. M. Johnson, D. R. Rhiger. Historical perspective on HgCdTe material and device development at Raytheon vision systems[C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 7298U-1
- 9 W. A. Beck, J. R. Anderson. Determination of electrical transport properties using a novel magnetic field-dependent hall technique[J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**(2): 541~545