

全耗尽用极低背景浓度碲镉汞 外延材料的电学性质*

沈川[†] 张娟 周梅华 王莹 卜顺栋 陈路 何力

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外探测全国重点实验室, 上海 200083)

(2025 年 10 月 21 日收到; 2025 年 12 月 19 日收到修改稿)

本文对适用于全耗尽结构的极低背景浓度碲镉汞 (HgCdTe) 外延材料的电学性质进行研究. 采用微分霍尔等测试手段对实验材料进行表征, 并结合建立的双层霍尔模型推导获得 HgCdTe 外延材料的真实背景浓度. 研究发现, 常规霍尔测试工艺下 HgCdTe 材料的表面状态会影响测试结果, 尤其是针对极低背景浓度材料. 对于组分约 0.3 的中波 HgCdTe 外延材料, 采用模型表征获得的背景浓度范围为 $8 \times 10^{12} - 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 满足高质量中波全耗尽结构 HgCdTe 器件的研制要求. 同时, 以获得的真实 HgCdTe 材料的背景浓度为基础, 对中波 HgCdTe 全耗尽结构器件进行二维数值模拟, 获得其耗尽区宽度随偏压的变化趋势, 为后续研制中波 HgCdTe 的全耗尽结构提供基础支持.

关键词: 碲镉汞, 全耗尽结构, 低背景浓度, 霍尔浓度

DOI: 10.7498/aps.75.20251437

CSTR: 32037.14.aps.75.20251437

1 引言

碲镉汞因具备高吸收系数、高量子效率及禁带宽度可调控 (对应红外波段可调) 的核心特性, 自研发以来始终是红外光电探测器及新一代红外器件的首选核心材料, 在低背景辐射探测、高精度红外成像等关键领域中, 相关研究与应用已得到广泛验证^[1-9]. 近十年来, 为弥补 HgCdTe 器件在规模化制备及成本控制方面的潜在挑战, 科研界开展了大量基于 III-V 族材料的替代红外探测器技术研发^[10,11], 其中量子阱红外探测器 (QWIPs)、超晶格 (SLS) 探测器等方案, 凭借材料制备工艺成熟度优势展现出一定发展潜力. 然而, 在低背景军用探测、商用航天遥感、机载甚长波红外高光谱成像及天文学观测等对器件性能要求严苛的场景中,

HgCdTe 仍保持着红外探测材料技术的性能上限, 其综合性能优势尚未被 III-V 族替代技术突破.

尤其是 Teledyne 公司于 2019 年提出 “Law 19” 定律^[12], 旨在替代 “Rule07” 法则以精准表征 HgCdTe 探测器的性能极限^[13], 其提出当 HgCdTe 探测器结构参数发生变化时, 由背景辐射主导的实际暗电流值, 可显著低于 “Rule07” 的预测结果——不仅能降低数个数量级, 更可突破俄歇复合极限达到更低的暗电流水平. 背景辐射限制性能兼具物理根本性与机理驱动性, 更符合探测器实际极限状态.

在此背景下, HgCdTe 全耗尽结构的研究价值逐渐凸显^[14-17]: 该结构可通过生长极低背景浓度的吸收层, 实现吸收层内载流子的完全耗尽, 进而优化载流子运输效率、抑制体内漏电流. 低掺杂浓度是调控 HgCdTe 器件耗尽模式与电性能的核心

* 中国科学院基础与交叉前沿科研先导专项 (批准号: XDB0980000) 和上海市自然科学基金-青年项目 (批准号: 25ZR1402543) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: shenchuan@mail.sitp.ac.cn

变量. 一定偏压下, 当吸收层掺杂浓度未降至全耗尽阈值时, 器件仍处于部分耗尽状态, 准中性区依然存在, 此时吸收层内残留的未耗尽载流子会成为扩散电流的主要来源, 导致暗电流密度显著上升, 器件在本征 (HOT) 工作温度下的性能偏离 Auger 限制. 而当掺杂浓度降低至极低水平 (如低至 10^{13} cm^{-3} 量级 n 型掺杂), 耗尽区可完全覆盖吸收层, 不仅能大幅削减载流子扩散引发的暗电流分量, 更进一步的还能通过抽运本征载流子实现 Auger 抑制, 使器件暗电流逼近背景辐射极限 (BLIP). 可见, 如何获得极低背景浓度的吸收层以及如何对其电学性能进行真实的表征是其核心难点. 国际上在极低背景浓度的 HgCdTe 材料上的研究报道较少, 只有 Teledyne 公司明确地报道其制备获得了浓度接近 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 的 HgCdTe 外延材料, 但详细的工艺以及表征方法都未有报道^[12].

本文在前期研究的基础上, 对外延生长获得的极低背景浓度 HgCdTe 外延材料的电学性质进行研究, 确认影响材料真实电学性质表征的核心因素. 采用微分霍尔等测试手段对其纵向分布进行表征, 通过引入适用于极低背景浓度表征的双层霍尔模型, 推导获得 HgCdTe 外延材料的真实背景浓度, 为后续 HgCdTe 全耗尽结构的器件研制和性能评价提供基础支撑.

2 实验

采用 CdZnTe 衬底上外延生长无故意掺杂的极低背景浓度的中波 HgCdTe 外延材料, 厚度约 3—15 μm . 外延材料经过长时间的退火工艺后, 消除 HgCdTe 材料内部的 Hg 空位, 形成能反映背景载流子状态的 N 型 HgCdTe 材料. 图 1 为极低背景浓度 HgCdTe 外延材料的结构示意图.

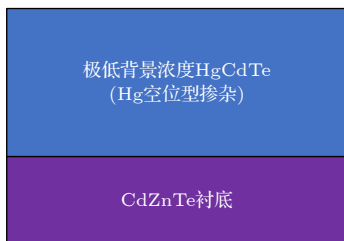


图 1 HgCdTe 外延材料的结构示意图

Fig. 1. Structural schematic of HgCdTe epitaxial materials.

实验中, 先选取外延后的材料切片成边长为 1 cm 的正方形样品. 然后对其组分、厚度、表面缺陷以及晶体质量进行表征测试, 确保材料整体性能的稳定. 实验材料经过表面清洗、化学腐蚀、N 型退火等工艺过程, 整个实验过程采用前期研究的最优化工艺条件以求能最大限度地消除 Hg 空位, 获得稳定的 N 型 HgCdTe 外延材料. 然后, 对实验材料进行纵向的微分剥层, 每次的微分剥层中进行霍尔浓度的测量. 整个纵向微分剥层需要控制每一层的厚度, 同时进行精准的厚度测量.

3 结果与讨论

经过前期研究工作, 在优化的外延生长工艺下, 我们能批量性获得极低背景浓度的 HgCdTe 外延材料. 本文针对极低背景浓度的 HgCdTe 外延材料的电学性质进行定量化的研究.

首先, 选取多个极低背景浓度的 HgCdTe 材料, 样品组分都在 0.29—0.32 范围内. N 型退火前, 对实验样品进行表面缺陷以及 X 射线衍射 (XRD) 等常规性能检测, 确保材料初始质量性状稳定并满足器件制备需求. N 型退火完成后, 对所有样品进行霍尔浓度的常规测试, 测试温度为 77 K. 图 2 为碲镉汞外延材料的测试厚度和 77 K 下霍尔浓度的对应关系图, 其中横坐标为每个测试样品的碲镉汞层厚度. 从图 2 可以看到, 碲镉汞外延材料的厚度和霍尔浓度之间存在一个明显的统计性的关系. 当材料的厚度增大, 材料的霍尔浓度虽然在一定范围内存在数值上的波动, 但整体趋势随之减小. 材料厚度从 5 μm 增至 13 μm , 其测到的霍尔浓度的变化从大于 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 减小到约 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

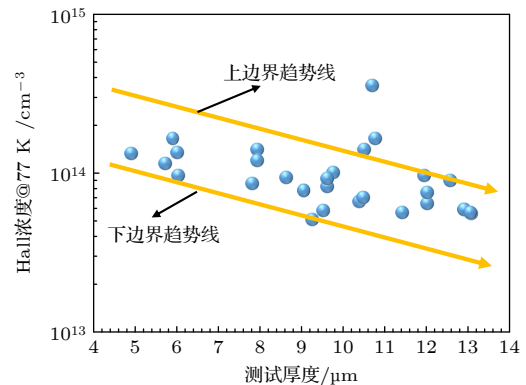


图 2 不同测试厚度的碲镉汞外延材料的霍尔浓度图

Fig. 2. Hall concentration of HgCdTe epitaxial materials for different thickness.

碲镉汞材料的背景载流子浓度,即背景残余杂质浓度,认为是碲镉汞材料生长过程中无故意掺杂情况下获得的原生外延材料的载流子浓度.其原则上和整体生长工艺过程的纯净度因素相关,和测试厚度无关.由此结合图2中的统计性现象,我们确认常规的霍尔测试表征方法受到材料表面态的影响,需要建立如下的模型进行修正.

常规霍尔测试获得的霍尔浓度是一个综合效应,即反映的是整个碲镉汞层的纵向载流子分布下的整体效应.对于碲镉汞材料,由于存在较为活泼的Hg原子和表面大量的悬挂键,容易造成表面氧化及形成表面态,因此会使得霍尔测试时实际测量结果包含一个表面状态层的影响.所以,将常规的单层霍尔测试模型转化为双层霍尔测试模型.这里假设影响整个材料电学霍尔测试的有两层:一层是碲镉汞的体内层,即为碲镉汞生长过程中形成的稳定电学层,根据外延生长工艺的特点,其电学性能应该是均匀分布的;另一层是近表面的表面混合层,即把可能的表面氧化层以及表面的固定电荷聚集区都综合为等效表面层.如图3所示是适用于极低背景浓度碲镉汞材料的等效双层霍尔模型.

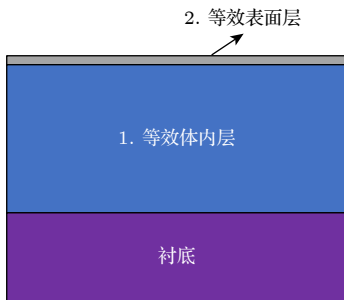


图3 HgCdTe外延材料的等效双层霍尔模型示意图
Fig. 3. Equivalent double-layer Hall structure of HgCdTe epitaxial materials.

对于双层结构的霍尔测试,测试获得的霍尔浓度变为有效霍尔浓度 n_{eff} ,根据基础的霍尔浓度公式^[18]推导获得如下公式:

$$n_{\text{eff}} = \frac{(n_1 t_1 \mu_1 + n_2 t_2 \mu_2)^2}{(n_1 \mu_1^2 t_1 + n_2 \mu_2^2 t_2)(t_1 + t_2)}, \quad (1)$$

其中, n_1 , n_2 为等效体内层和等效表面层的载流子浓度, t_1 , t_2 为两层的厚度, μ_1 , μ_2 为两层的载流子迁移率.由于这两层都为N型层,可以假设两层的迁移率相同,则公式简化为如下:

$$n_{\text{eff}} = \frac{n_1 t_1 + n_2 t_2}{t_1 + t_2}. \quad (2)$$

在优化的微分霍尔测试工艺情况下,可以认为每一次测试的等效表面层状态都是近似相同的,则公式中 $n_2 t_2$ 是一个常数,设为 n_{surface} ,且研究确认厚度 t_2 约为几纳米,远小于总厚度 $(t_1 + t_2) = t_1 = d$,则相应公式简化为

$$n_{\text{eff}} = \frac{n_1 d + n_{\text{surface}}}{d} = n_1 + \frac{n_{\text{surface}}}{d}. \quad (3)$$

由此可见,测试的有效霍尔浓度 n_{eff} 是一个和碲镉汞材料厚度相关的量,其和 $1/d$ 成线性关系.

我们对4个相同生长工艺下外延生长的极低背景浓度的碲镉汞样品进行微分霍尔测试,剥层精度控制在 $1 \mu\text{m}$ 左右.

图4为4个碲镉汞材料的微分霍尔测试结果图,其中,横坐标为每层微分霍尔的厚度的倒数.图中的不同颜色点代表不同编号实验样品进行的微分霍尔测试值,不同颜色直线是相应的拟合曲线.从图4可见,实验测试的有效霍尔浓度和 $1/d$ 之间呈现良好的线性关系,很好地满足了双层结构霍尔模型的推导公式.这验证了双层霍尔模型的准确性.从图中的4个样品可见,其拟合后获得各自等效体内层载流子浓度 n_1 在 $8 \times 10^{12} \sim 2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 之间. n_1 存在一定的离散性主要是虽然是相同的生长工艺,但在工艺操作过程中如衬底清洗装样等过程中依然有一定的控制偏差.图5是与国际Teledyne公司报道^[12]的最好水平对比.可以看到,中波碲镉汞外延材料真实的体背景浓度媲美国际先进水平.同时,在此优化的外延生长工艺下获得的碲镉汞材料的体背景浓度的重复性良好,达到全耗尽结构需要的极低背景浓度要求.

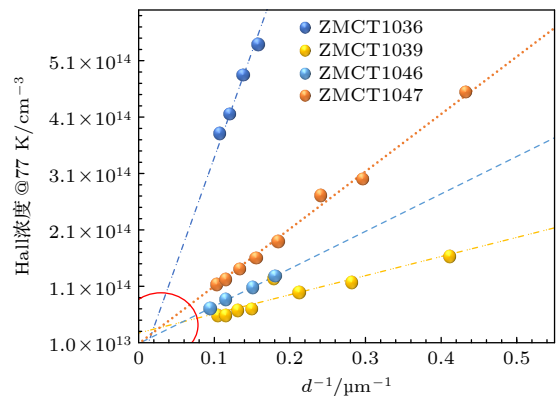


图4 4个碲镉汞外延材料的微分霍尔测试结果图
Fig. 4. Differential Hall measurement results of four HgCdTe epitaxial materials.

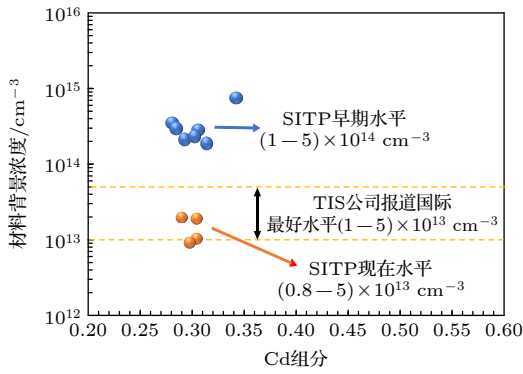


图 5 SITP 碲镉汞外延材料背景浓度与国际水平对比
Fig. 5. Background concentrating of SITP HgCdTe epitaxial materials and comparison with international advanced level.

从图 4 进一步可见, 针对不同碲镉汞 (HgCdTe) 样品, 其对应测试曲线的斜率呈现出显著离散性. 根据 (3) 式的物理内涵, 该曲线斜率直接关联并表征材料的等效表面层特性, 由此可明确推断: 不同 HgCdTe 样品, 尤其是经化学腐蚀工艺处理后的样品, 其表面微观状态存在显著差异. 这是由于化学腐蚀过程会对 HgCdTe 材料的表面原子组态产生明显调控作用 [19-21]. 腐蚀反应会打破材料表面原有的晶格完整性, 比如导致表层原子 (Hg, Cd 和 Te) 易形成悬挂键, 悬挂键可吸附外界离子而引入电荷, 同时形成一个带电的表面层. 或者表层发生偏析富集, 部分原子还可能因氧化作用生成氧化物相, 比如 TeO_2 等. Hg, Cd, Te 原子的表层状态变化, 会直接引发表层电荷积累行为的差异, 并通过悬挂键、缺陷等界面态的综合作用, 最终体现为等效表面层的物理特性分化. 而这种表面微观状态的差异性, 其根源在于 HgCdTe 材料自身的本征属性, 包括晶体生长过程中形成的位错、孪晶等晶格缺陷密度, 以及材料组分均匀性 (如 Cd 组分的梯度分布特征) 等关键参数. 同时对不同 In 掺杂浓度的碲镉汞材料进行微分霍尔测试, 对上述模型进行验证. 表 1 中可见, 经过模型拟合获得的等效体背景浓度和实际 In 掺杂浓度 (二次离子质谱 SIMS 测试结果) 能一一对应, 误差在测试误差范围内, 进一步验证了上述模型解释的正确性.

图 6 中所示, 以获得的碲镉汞材料的低背景浓度范围为基础, 对中波 HgCdTe 全耗尽结构器件进行二维数值模拟, 获得其耗尽区宽度随偏压的变化趋势. 对于掺杂浓度 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 当反向偏压加到大于 0.1 V 时, 其耗尽区宽度为 $5 \mu\text{m}$, 可实现中波

碲镉汞的全耗尽结构. 对于掺杂浓度 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 当反向偏压加到大于 0.5 V 时, 其耗尽区宽度为 $5 \mu\text{m}$, 可实现中波碲镉汞的全耗尽结构. 可见, 当前的极低背景浓度的碲镉汞材料能为后续碲镉汞全耗尽结构器件的研制提供材料基础保证. 当然, 最终决定实际器件的暗电流的因素还涉及器件制备等工艺, 如成结工艺、钝化层、金属接触等器件工艺都是十分重要的, 需要后续投入研究.

表 1 In 掺杂碲镉汞材料的模型验证
Table 1. Model validation of in-doped HgCdTe.

材料名	等效体背景浓度/ cm^{-3} (模型拟合截距)	In 掺杂浓度/ cm^{-3} (SIMS 测试)
样品 A	2.1×10^{14}	$1.9 \times 10^{14} - 2.1 \times 10^{14}$
样品 B	2.5×10^{14}	$3.0 \times 10^{14} - 4.0 \times 10^{14}$
样品 C	9.7×10^{14}	$9.0 \times 10^{14} - 1.0 \times 10^{15}$

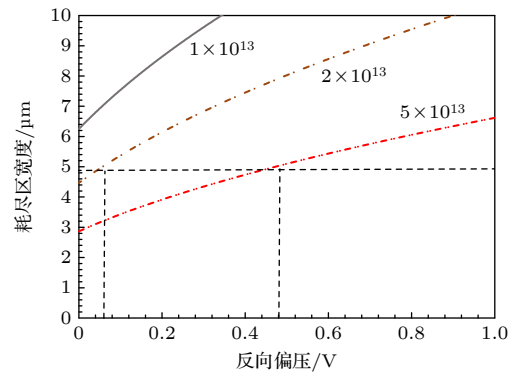


图 6 碲镉汞耗尽区宽度随反向偏压的关系图
Fig. 6. Depletion region width of HgCdTe as a function of reverse bias.

4 结论

通过对生长获得的极低背景浓度碲镉汞外延材料的电学性质进行微分霍尔表征研究, 并结合建立的双层霍尔模型能有效地表征碲镉汞外延材料的真实体背景浓度. 研究验证了此模型能很好地解释常规霍尔测试的现象, 有效消除材料等效表面层的影响, 尤其是针对极低背景浓度材料. 同时, 获得中波碲镉汞外延材料真实的体背景浓度范围为 $8 \times 10^{12} - 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 媲美国际报道先进水平, 满足高质量中波全耗尽结构碲镉汞器件的研制要求.

参考文献

[1] Rogalski A 2011 *Infrared Phys. Technol.* **54** 136
[2] Qiu W, Hu W 2015 *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **58**

- 027001
- [3] Xie H, Guo H, Zhu L 2023 *Infrared Phys. Technol.* **135** 104994
- [4] Xie H, Li H, Yang L 2025 *Infrared Phys. Technol.* **147** 105781
- [5] Liu M, Wang C, Zhou L Q 2019 *Chin. Phys. B* **28** 037804
- [6] Yue F Y, Ma S Y, Hong J, Yang P X, Jing C B, Chen Y, Chu J H 2019 *Chin. Phys. B* **28** 017104
- [7] Xu G Q, Liu X Y, Zhang K F, Du Y C, Li X Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 116102 (in Chinese) [徐国庆, 刘向阳, 张可锋, 杜云辰, 李向阳 2015 *物理学报* **64** 116102]
- [8] Chen G B, Li Z F, Cai W Y, He L, Hu X N, Lu W, Shen X C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1496 (in Chinese) [陈贵宾, 李志锋, 蔡炜颖, 何力, 胡晓宁, 陆卫, 沈学础 2003 *物理学报* **52** 1496]
- [9] Shen C, Zhang J, Yang L, Guo H J, Xie H, Zhou M H, Chen L, He L 2024 *J. Infrared Millim. Waves* **43** 173 (in Chinese) [沈川, 张竞, 杨辽, 郭慧君, 谢浩, 周梅华, 陈路, 何力 2024 *红外与毫米波学报* **43** 173]
- [10] Rogalski A, Ciupa R 1999 *SPIE* **3629** 0277
- [11] Rogalski A 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 4355
- [12] Donald L, Dreiske P, Ellsworth J 2020 *Proc. SPIE* 11407
- [13] Tennant W E 2010 *J. Electron. Mater.* **39** 1030
- [14] Ashley T, Elliot C T, Harker A T 1986 *Infrared Phys.* **26** 303
- [15] Martyniuk P, Rogalski A 2013 *Opto Elect. Rev.* **21** 240
- [16] Velicu S, Grein C H, Emelie P Y, Itsuno A, Philips J D, Wijewarnasuriya P 2010 *J. Electron. Mater.* **39** 873
- [17] Schuster J, Dewames R E, Wijewarnasuriya P S 2017 *J. Electron. Mater.* **49** 6295
- [18] Peng M Z, Cong S R, Guo Q Y 2018 *Infrared Technol.* **40** 847 (in Chinese) [彭曼泽, 丛树仁, 郭沁怡 2018 *红外技术* **40** 847]
- [19] Wang Y F, Liu L M, Sun X L, Chen Y 2012 *Infrared* **33** 1 (in Chinese) [王忆峰, 刘黎明, 孙祥乐 2012 *红外* **33** 1]
- [20] Liu Y Z, Li S J, Zhang Y X, Xin Y G, Li Z H, Lin Y, Li X J, Qin Q, Jiang J, Guo J H 2023 *J. Infrared Millim. Waves* **42** 149
- [21] Zhu X C 2001 *Infrared Technol.* **23** 19 (in Chinese) [朱惜辰 2001 *红外技术* **23** 19]

Electrical properties of low background concentration HgCdTe for fully depleted structure*

SHEN Chuan[†] ZHANG Juan ZHOU Meihua WANG Ying
BU Shundong CHEN Lu HE Li

(National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(Received 21 October 2025; revised manuscript received 19 December 2025)

Abstract

This paper presents a quantitative study on the electrical properties of HgCdTe epitaxial materials with ultra-low background carrier concentrations, to support the development of fully depleted infrared structure. Conventional Hall measurements at 77 K reveals a distinct thickness-dependent carrier concentration in undoped mid-wavelength HgCdTe (Cd composition $\approx 0.29-0.32$): the measured Hall concentration decreases from $>1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ to $\sim 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ as the epilayer thickness increased from 5 μm to 13 μm . This phenomenon is attributed to surface states induced by oxidation and dangling bonds, which distort the standard single-layer Hall effect analysis and lead to inaccurate bulk parameter extraction.

To decouple surface and bulk contributions, a double-layer Hall model is developed, where the effective Hall concentration n_{eff} is the combined response of a uniform bulk layer and a near-surface mixed layer. Assuming equal carrier mobilities in both layers, the model simplifies to $n_{\text{eff}} = n_1 + n_{\text{surface}}/d$, predicting a linear correlation between n_{eff} and $1/d$. Differential Hall measurements with $\sim 1 \mu\text{m}$ stepwise etching precision are performed on four ultra-low-background HgCdTe samples, and the experimental results confirm this linear relationship, validating the model. The intrinsic bulk background concentrations extracted from fitted line intercepts ranges from 8×10^{12} to $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, comparable to international state-of-the-art values (e.g., Teledyne). Slope variations among samples reflect surface microstate differences, associated with chemical etching, dislocation density, and compositional uniformity.

The model is further verified by In-doped HgCdTe samples, with bulk concentrations derived from the model matching secondary ion mass spectrometry (SIMS) results within experimental error. Two-dimensional numerical simulations of mid-wavelength fully depleted HgCdTe devices show that a 5 μm depletion width is achieved at reverse bias $>0.1 \text{ V}$ for $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ doping, and $>0.5 \text{ V}$ for $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. These results confirm that the HgCdTe materials, with reproducible ultra-low background concentrations, provide a material basis for fabricating HgCdTe fully depleted structures.

Keywords: HgCdTe, fully depleted structure, low background concentration, Hall concentration

DOI: [10.7498/aps.75.20251437](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251437)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251437](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251437)

* Project supported by the Strategic Priority Research Program (B) of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB0980000) and the Natural Science Foundation of Shanghai-Youth Program, China (Grant No. 25ZR1402543).

[†] Corresponding author. E-mail: shenchuan@mail.sitp.ac.cn



全耗尽用极低背景浓度碲镉汞外延材料的电学性质

沈川 张娟 周梅华 王莹 卜顺栋 陈路 何力

Electrical properties of low background concentration HgCdTe for fully depleted structure

SHEN Chuan ZHANG Juan ZHOU Meihua WANG Ying BU Shundong CHEN Lu HE Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 080713 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251437

CSTR: 32037.14.aps.75.20251437

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251437>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器空间质子位移损伤及电离总剂量效应Geant4仿真

Geant4 simulation of Hg_{1-x}Cd_xTe infrared focal plane array image sensor space proton displacement damage and total ionizing dose effects

物理学报. 2024, 73(23): 232402 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241246>

全耗尽绝缘体上硅氧化铪基铁电场效应晶体管存储单元单粒子效应计算机模拟研究

Numerical simulation of single-event effects in fully-depleted silicon-on-insulator HfO₂-based ferroelectric field-effect transistor memory cell

物理学报. 2022, 71(6): 068501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211655>

中子对碲镉镉辐照损伤模拟研究

Simulation study of neutron radiation damage to cadmium zinc telluride

物理学报. 2022, 71(22): 226102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221195>

氦浓度对单晶铁缺陷演化及力学性能的影响规律与微观关联机制

Effects of helium concentration on defect evolution and mechanical properties in single-crystal iron: Laws and microscopic correlation mechanisms

物理学报. 2026, 75(1): 226102 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251089>

氧空位浓度梯度分布的非晶WO₃模拟忆阻器在神经形态计算中的应用

Application of amorphous-WO₃ simulated memristors with oxygen vacancy concentration gradients in neuromorphic computing

物理学报. 2026, 75(4): 226102 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251348>

基于化学发光法的高纯气体中ppb量级NO_x浓度测量

Measurement of NO_x concentration at ppb level in high-purity gases based on chemiluminescence method

物理学报. 2022, 71(13): 137802 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220061>