

文章编号: 1672-8785(2018)12-0012-04

碲镉汞光伏二极管的电流与结深研究

祁娇娇 赵东升 徐长斌

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 采用 Sentaurus TCAD 软件对 n-on-p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 红外探测器的结构进行了建模, 并就结深对光伏二极管电流的影响进行了仿真和分析。结果表明, 结深对电流的影响受吸收层厚度和 p 区载流子浓度两方面的作用。对不同波长二极管的电流随结深的变化情况进行了拟合, 得出了不同波长条件下电流达到最大值时的结深大小。

关键词: $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$; 结深; 电流

中图分类号: TN3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.12.003

Study of the Current and Junction Depth of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Photovoltaic Diode

QI Jiao-jiao, ZHAO Dong-sheng, XU Chang-bin

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The structure of a n-on-p $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ infrared detector is modeled by the Sentaurus TCAD software. The influence of junction depth on the current of a photovoltaic diode is simulated and analyzed. The results show that the influence of junction depth on the current of the diode is affected by the thickness of absorption layer and the carrier concentration in p region. The change of the diodes for different wavelengths with junction depth is fitted and the junction depth for maximal current at different wavelengths is obtained.

Key words: $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$; junction; current

0 引言

碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)是一种窄禁带半导体材料, 因其带隙可调, 可应用于不同波段的红外探测器的制备。光伏型红外焦平面探测器由光伏二极管组成。pn 结是光伏二极管的核心, 其制备方式包括离子注入、离子束诱导转型等。其中, 离子注入是使用最多的一种成结

工艺, 它具有浅结、低温以及结深精确控制等优点^[7]; 离子束诱导转型成结可以克服离子注入成结工艺中钝化层有损伤的弊病^[2]。目前有较多关于 pn 结制备工艺的研究成果, 但结深对碲镉汞光电二极管电流的影响还鲜有报道。

本文借助 Sentaurus TCAD 工具对 $9\ \mu\text{m}$ 光

收稿日期: 2018-11-01

作者简介: 祁娇娇(1988-), 女, 河北衡水人, 工程师, 主要研究方向为红外探测器芯片制备。

E-mail: qjj_711@163.com

电二极管的电流随结深的变化情况及其原因进行了分析, 并根据仿真结果对不同波长碲镉汞二极管的电流与结深的关系进行了拟合, 得出了最优结深随二极管波长的变化规律。

1 仿真模型

1.1 器件结构模型

本文以 n-on-p 型碲镉汞光伏二极管为例, 首先在 Sentaurus TCAD 半导体仿真软件中利用 Structure Editor 工具对器件结构进行设计, 并对有限元网格进行划分。图 1 为 n-on-p 型碲镉汞光伏二极管的剖面结构图。其中, “P-body”是 P 型碲镉汞衬底, 其厚度为 $6\text{ }\mu\text{m}$; 作为器件的吸收层, x 值为 0.225, 波长为 $9\text{ }\mu\text{m}$ 。通过离子注入的方式在 P-body 衬底中形成同质 pn 结。“Passivation”是器件的表面钝化层, “N⁺”为重掺杂的 n 区。在建立物理模型时, 不考虑工艺过程中刻蚀损伤及电极制备的影响, 将钝化层/碲镉汞界面简化为密度为 10^{12} cm^{-2} 的界面态^[8]。N⁺ 区的载流子分布简化为高斯分布, P 代表吸收层电极, N 代表 N⁺ 区电极。

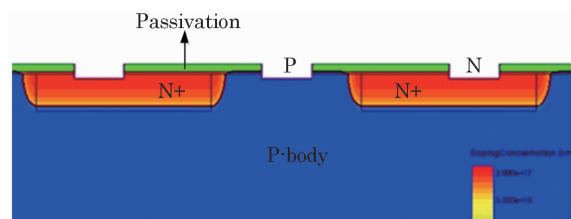


图 1 n-on-p 碲镉汞光伏二极管的剖面图

1.2 材料特性参数

在对半导体器件结构进行仿真时, 除了定义器件的物理模型之外, 还需要定义所用材料的相关参数^[9]。作为三系金属化合物半导体材料, 碲镉汞的参数包括禁带宽度、电子亲和能、电子空穴迁移率和电子空穴有效质量等。其中, 禁带宽度、迁移率、有效质量和电子亲和能均与 x 值及晶格温度有关。

2 电流与结深的关系

用碲镉汞材料制备的 p-n 结光电二极管的电流主要由产生-复合电流和扩散电流两部分

组成。其中, 扩散电流是一个基本的电流机制, 它起源于一个少数载流子扩散长度范围内, 空间电荷层区域中的电子空穴对的无规则产生和复合。对于在 77 K 及以上温度工作的器件来说, 扩散电流通常起主导作用^[3]。

2.1 电流随结深变化的仿真结果

选取 $x=2.225$, $\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$ 的材料进行仿真。入射光的截止波长为 $9\text{ }\mu\text{m}$ 。对结深分别为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.8\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的二极管的电流进行分析(结果见图 2)。从图 2 中可以看出, 当结深小于 $1.26\text{ }\mu\text{m}$ 时, 二极管 N 极的电流随结深的增加而增加; 当结深大于 $1.26\text{ }\mu\text{m}$ 时, 二极管 N 极的电流随结深的增加而减小。

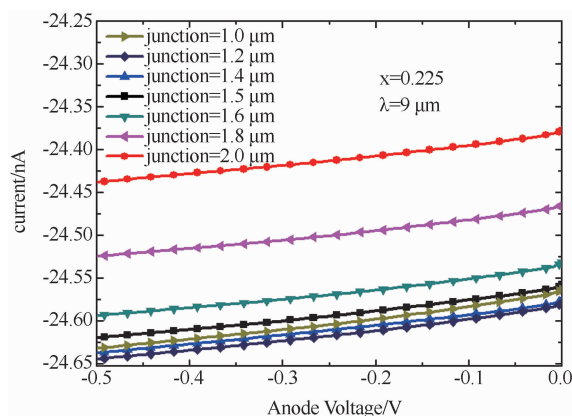


图 2 $\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$ 时器件电流随电压的变化曲线

为了计算 p 区的扩散电流, 需要作以下假定: (1) n 区与 p 区之间的过渡层足够薄, 因此 n 区和 p 区载流子都是均匀分布的, 电压均在空间电荷区; (2) 在低注入的条件下, 多数载流子浓度远远大于少数载流子浓度; (3) 载流子分布非简并, 热平衡载流子浓度在每个区域都服从:

$$n(x)p(x)=n_i^2 \quad (1)$$

若 p 区的厚度 d 远远大于少数载流子的扩散长度 L_e , 则可得出光伏二极管的扩散电流:

$$I_e=e\frac{n_i^2}{N_A L_e}D_e\left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right)-1\right] \quad (2)$$

由式(2)可知, 电流密度与多数载流子浓度成反比。图 3 所示为不同结深条件下的 p 区

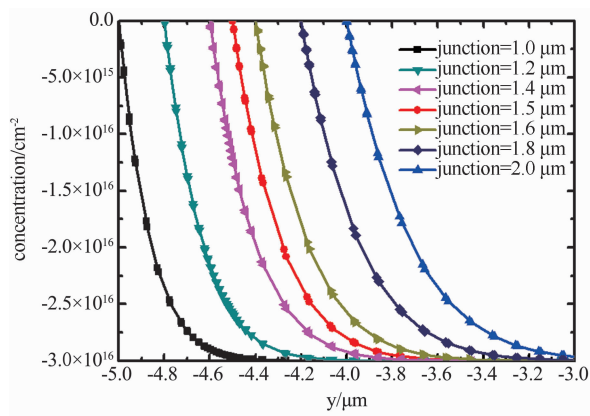


图 3 不同结深条件下的 p 区载流子分布图

载流子浓度分布。可以看出, 在同一吸收层区域内, 随着结深的增加, p 区载流子浓度降低; 电流随结深的变化呈正相关, 因此二极管电流随着结深的增大而增大。

对于典型的 n-on-p 碲镉汞红外探测器, 红外辐射信号从探测器的背面照射过来, 被吸收层 p 区、 N^+ 区和 pn 结中处于价带的电子吸收, 然后向导带跃迁, 产生电子空穴对。它们在 pn 结空间电场的作用下运动, 对电极贡献电流。在探测器吸收层厚度较薄的条件下, 红外辐射信号的吸收会随着吸收层厚度的增加而增多。当吸收的辐射信号增加时, 产生的非平衡空穴电子对增多, 则二极管的光电流越大。在吸收层厚度进一步增加的情况下, 被吸收的红外信号随距离的增加呈指数衰减, 即红外信号被吸收层吸收并产生空穴电子对的现象主要发生在红外信号刚进入吸收层的前一段距离内^[4]。当吸收层超过一定厚度时, 主要吸收红外信号的区域离 pn 结的距离增加, 非平衡的电子空穴对在扩散过程中复合的概率增大, 导致二极管的光电流减小。可以说, 二极管的光电流随吸收层厚度的变化是由上述两种机制互相竞争导致的^[4]。当吸收层厚度较薄时, 二极管电流受前一种机制的影响占主导作用, 即光电流随着吸收层厚度的增加而增加。当吸收层厚度较大时, 二极管电流受后一种机制的影响占主导作用, 即光电流随着吸收层厚度的增加而减小^[4]。在进行器件仿真时, P-body 区的

厚度为 $6\ \mu\text{m}$ 。随着二极管结深的增加, 吸收层的厚度减小, 从背面入射的红外辐射信号的吸收量减少, 产生的非平衡电子空穴对数目减小, 光电流减弱, 则二极管的电流减小。

二极管的电流受到以上两种机制的作用。在结深较浅时, p 区载流子浓度对二极管电流的影响机制起主要作用, 即二极管电流随结深的增加而增大; 随着结深的进一步增加, 吸收层厚度对二极管电流的变化起主导作用, 即二极管电流随结深的增加而减小。因此, 当 P-body 区的厚度为 $6\ \mu\text{m}$ 时, 碲镉汞二极管电流的绝对值随结深的增加先增大再减小。

2.2 结深对不同波长二极管的影响

对波长为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $12.5\ \mu\text{m}$ 的二极管的电流进行了仿真(结果见图 4)。可以看出, 结深对 $10\ \mu\text{m}$ 和 $12.5\ \mu\text{m}$ 二极管电流的影响规律与 $9\ \mu\text{m}$ 器件相同。

选取反向偏压为 $0.1\ \text{V}$ 的二极管的电流进

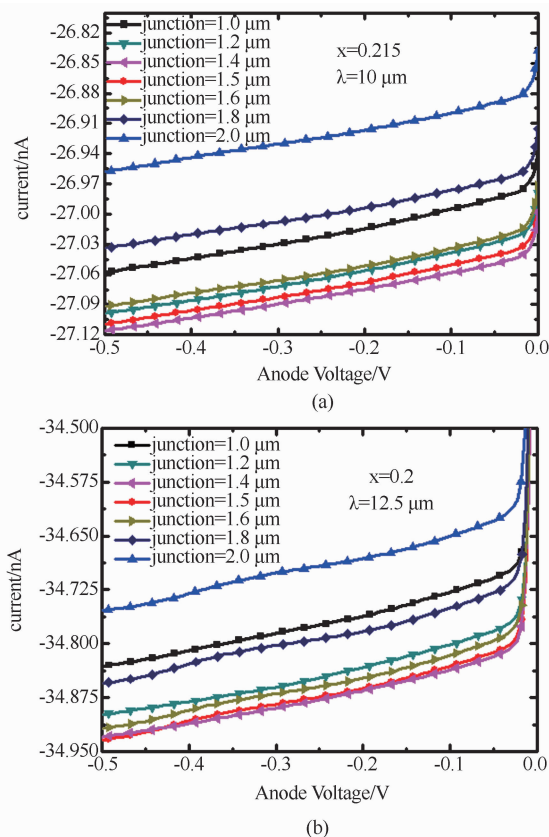


图 4 不同结深二极管的电流随电压的变化:(a) $\lambda = 10\ \mu\text{m}$; (b) $\lambda = 12.5\ \mu\text{m}$

行了拟合(结果见图 5), 得到了不同波长条件下二极管电流最大时的结深值。在同等碲镉汞厚度的条件下, $9\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $12.5\text{ }\mu\text{m}$ 器件的最优结深分别为 $1.26\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.39\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.43\text{ }\mu\text{m}$ 。

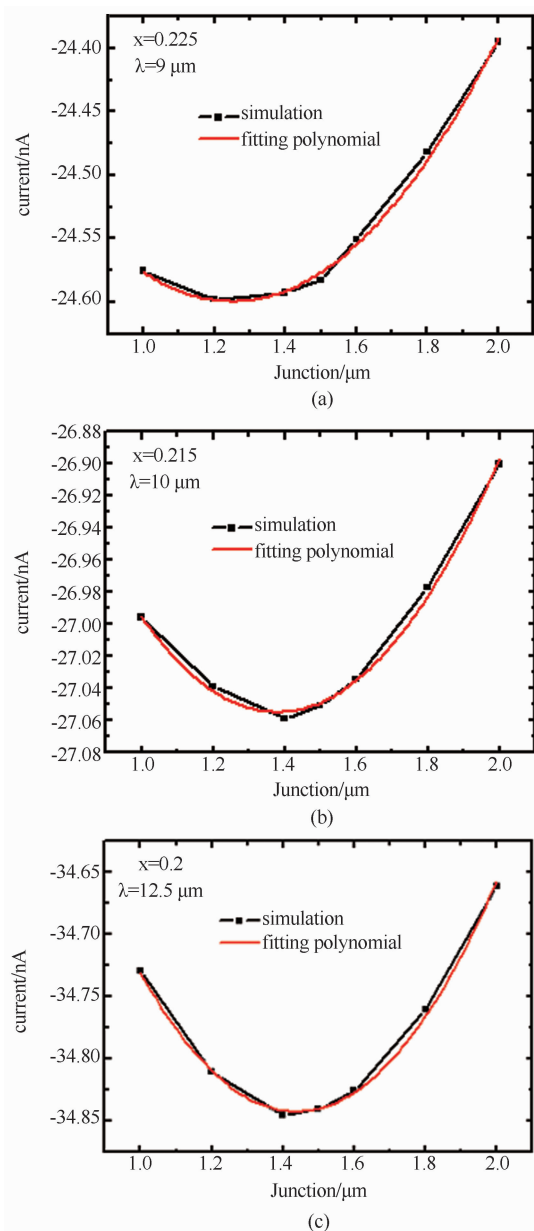


图 5 二极管电流与结深的关系:(a) $\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$;
(b) $\lambda=10\text{ }\mu\text{m}$; (c) $\lambda=12.5\text{ }\mu\text{m}$

3 结束语

当工作在 77 K 及以上温度时, 碲镉汞光伏二极管的电流主要是扩散电流起主要作用;

当 n 区载流子浓度远远大于 p 区载流子浓度时, p 区扩散电流是光伏二极管的主要电流来源。通过仿真发现, 结深对二极管电流具有一定的影响作用, 吸收层厚度和 p 区载流子浓度是导致电流随结深变化的主要原因。通过对二极管电流随结深的变化进行拟合发现, 当结深达到某值时, 二极管的光生电流达到最大值。对 $9\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $12.5\text{ }\mu\text{m}$ 器件的电流随结深的变化情况进行了拟合。结果表明, 随着波长的增大, 二极管电流的绝对值最大时的结深加深。在长波和甚长波碲镉汞红外探测器的制备过程中, 可以通过调节注入区的结深来改变不同波段探测器的信号大小。

参考文献

- [1] 张国栋, 孙维国, 倪永平. Mg 离子注入成结制备 InSb 光电二极管阵列研究 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(1): 19–22.
- [2] 王忆锋, 唐利斌. 碲镉汞 pn 结制备技术的研究发展 [J]. 红外技术, 2009, 31(9): 497–503.
- [3] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] 何力, 杨定江, 倪国强, 等. 先进焦平面技术导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [5] Rogalski A. New Material Systems for Third Generation Infrared Detectors [C]. SPIE, 2009, 7388: 73880J.
- [6] Philippe Tribolet, Michel Vuillermet, David Billon Lanfrey. MCT IR Detectors in France [C]. SPIE, 2011, 8012: 801235.
- [7] 王忆锋, 唐利斌. 碲镉汞探测器制备湿法和干法工艺的研究进展 [J]. 红外技术, 2009, 31(3): 1–8.
- [8] 李龙, 孙浩, 朱西安. 碲镉汞长波探测器暗电流优化模拟 [J]. 激光与红外, 2014, 44(1): 41–45.
- [9] 李龙, 孙浩, 朱西安. 碲镉汞长波探测器暗电流仿真分析 [J]. 红外技术, 2014, 36(1): 73–78.