

文章编号:1001-5078(2014)01-0041-05

· 红外材料与器件 ·

碲镉汞长波探测器暗电流优化模拟

李 龙, 孙 浩, 朱西安

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:报道了利用 Silvaco 软件对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.22$) n-on-p 型长波探测器的模拟仿真结果。采用二维简化 pn 结模型,以品质因子 R_0A 为标准,模拟计算了载流子寿命、缺陷密度、表面态、p 区受主浓度、p 区厚度、n 区厚度宽度对暗电流的影响,得出在良好的品质因子范围内各个参量可以接受的范围。并针对重要参量利用软件对其复合速率,电流分布,载流子浓度等进行了详细模拟分析,为探测器设计制备提供了参考。

关键词:长波;碲镉汞;Silvaco;暗电流;品质因子

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.01.009

Simulation analysis of dark current in long wavelength HgCdTe infrared photodiode

LI Long, SUN Hao, ZHU Xi-an

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

Abstract: The performance of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.22$) n-on-p type LWIR photodiode is simulated by Silvaco. Referring to quality factor R_0A , the influence of carrier lifetime, defect density, surface states, P-type region doping concentration, thickness of P-type region, thickness and width of N-type region on dark current is simulated by using two-dimension pn junction model. Based on good quality factors, the acceptable range of all parameters is obtained. Software is used to simulate and analyze the key parameters' recombination rate, current distribution, carrier concentration, etc., which provides a reference for detector design and fabrication.

Key words: long wave; HgCdTe; Silvaco; dark current; quality factor

1 引 言

HgCdTe 具有带隙可调,光吸收系数大,载流子寿命长,电子迁移率高等优点,自 1959 年提出以来一直都作为制备红外焦平面探测器的首选材料^[1]。由 HgCdTe 材料制备的红外探测器在整个红外波段都具有很高的光子吸收率;而且工作温度较高(77K),具有很高的探测性能,在过去的五十多年中,HgCdTe 红外探测器在气象,地球观测、医疗、通讯、军事等方面均取得了长足的进步^[2]。目前已发展到了第三代红外焦平面探测器,器件呈现高集成度、高工作温度、低成本等特点^[3-4]。而其暗电流水平是决定探测器性能的关键要素,直接影响到红外系统的目标识别距离和虚警率,必须研究并尽量减

小暗电流的影响,因此对 HgCdTe 红外探测器的暗电流研究具有非常重要的理论和实际意义。

借助于公式算法或者软件进行器件工艺仿真模拟是个不错的方向,国内外有很多利用算法以及软件对 HgCdTe 材料及器件进行仿真模拟^[5-12],取得了不错的效果,极大地节约了金钱和时间成本。本篇文章基于 Silvaco 半导体仿真软件,针对 HgCdTe 长波探测器的暗电流进行仿真模拟,建立相应长波器件二维模型,分析了不同器件参量对器件暗电流

作者简介:李 龙(1988-),男,在读硕士,主要从事红外探测器的设计开发工作。E-mail:lilong713@126.com

收稿日期:2013-08-23;修订日期:2013-09-25

的影响,并针对重要参量对其器件复合速率,暗电流分布以及载流子分布进行了计算对比,取得了预期的效果。

2 数值模型

利用 Devedit 交互界面进行器件结构的设计和有限元网格划分,结构简化模型如图 1 所示。器件为 Hg 空位形 n-on-p 器件,P 区、N 区的 Cd 组分值 x 一致,为一同质平面结, $x = 0.22$ 。器件的电极以及接触孔刻蚀损伤对器件暗电流的影响忽略不计,表面钝化层的影响则以 HgCdTe 表面态作为边界条件简化,结区分布近似高斯分布,P 和 N 分别代表 p 区和 n 区电极。软件显示坐标为对数系坐标,例如 $15.5/\text{cm}^3$ 实际上为 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$,依此类推。

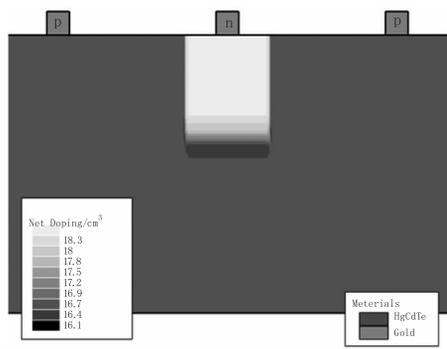


图1 探测器结构简化图

定义好数值模型后,通过改变不同设计、工艺参量,计算暗电流随电压的变化曲线,并求取动态电阻,计算出器件的品质因子 R_0A ,用品质因子作为衡量器件的暗电流水平的标准,研究分析其随参量的变化,确定工艺以及设计参量可以接受的范围,为器件工艺的制备及设计提供参考。

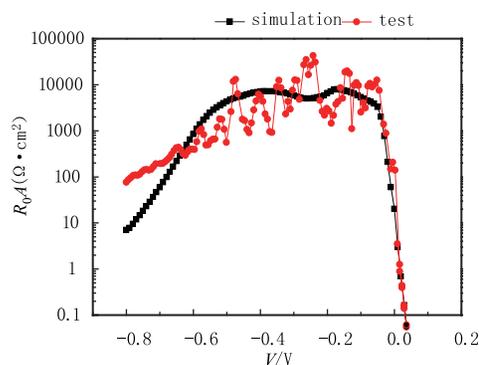


图2 仿真与实际 R_0A 的比较

经过与实际测量的动态电阻曲线比较(如图 2 所示),发现仿真结果还是比较贴近实际结果的,特别是 R_0A ,与实际结果相差无几,所以用仿真对其进行研究是可以说明问题的。下面将详细讨论不同参量对器件暗电流的影响。

3 结果及讨论

3.1 载流子寿命

针对 n-on-p 型器件,p 区电子的寿命对器件的性能影响最大,这里近似认为 p 区电子寿命为器件的载流子的寿命,来研究载流子寿命与暗电流的关系,结果如图 3 所示。

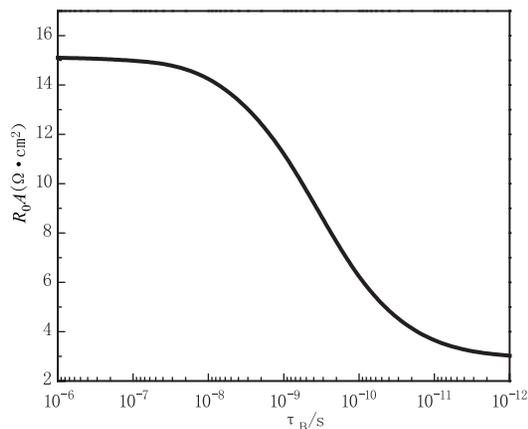


图3 R_0A 和载流子寿命的关系

p 区电子寿命在 10^{-6}s 到 10^{-8}s 之间,品质因子保持在一个较高的水平($15\Omega \cdot \text{cm}^2$ 左右),在 10^{-8}s 到 10^{-11}s 之间品质因子会随着寿命的减小而缓慢下降,当到达 10^{-11}s 时趋于平缓,所以通过结构设计和工艺控制,要尽量减小缺陷和载流子浓度对寿命的影响,把寿命保持在 10^{-8}s 以上会使得器件具有一个较好的性能,下面也将具体研究深能级缺陷和 p 区受主浓度对器件性能的影响。

3.2 深能级缺陷

探测器制备过程中总会不可避免的引入一些杂质或者缺陷,特别是 HgCdTe 材料,Hg 原子非常容易逸出,会在体内形成大量的 Hg 空位,这些 Hg 空位非常容易和杂质离子或原子结合,形成深能级中心,增加非平衡载流子的复合率,减小载流子寿命(τ_{SRH}),影响器件性能,假定深能级缺陷位置在禁带中央, R_0A 和深能级缺陷密度的关系如图 4 所示。

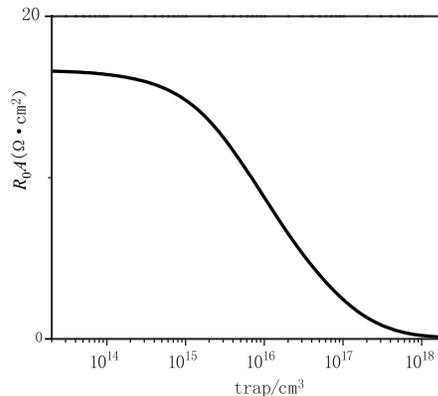


图4 R_0A 和缺陷密度的关系

当深能级缺陷密度低于 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$, 器件有一个较好的品质因子, 材料器件工艺要尽量把缺陷密度控制在这个范围之内, 当超过这个范围, 复合速率会迅速上升, 大幅减小载流子寿命。如图 5 所示, 对比了缺陷密度为 $2 \times 10^{14}/\text{cm}^3$, $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时的复合速率以及暗电流分布, 后者的复合速率比前者大了三个数量级, 这将产生非常大的产生复合电流, 和图中仿真结果一致, 后者的暗电流密度远远大于前者, 仿真计算得出在工作状态下深能级缺陷密度为 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时的暗电流输出为 200 nA, 超过了一般目标的光信号以及读出电路的饱和电流, 严重影响了器件的工作性能。

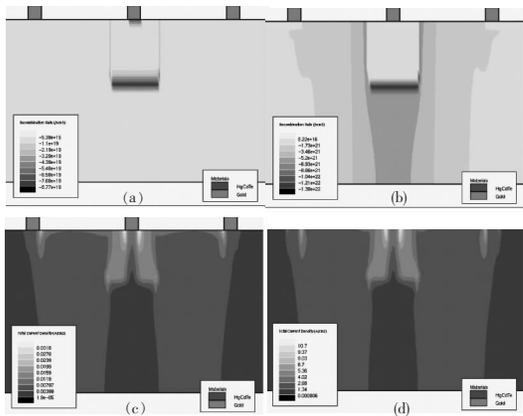


图 5 不同缺陷密度的复合速率和暗电流分布
(a) 缺陷密度 $2 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 时的复合速率分布;
(b) 缺陷密度 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时的复合速率分布;
(c) 缺陷密度 $2 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 时的暗电流分布;
(d) 缺陷密度 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时的暗电流分布

3.3 表面态

表面态会引起表面漏电流, 这是暗电流的主要来源之一, 主要分为表面复合电流以及表面沟道电流, 会对器件性能产生严重影响, 如图 6 和图 7 所示。表面态在 $1 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 左右时, 器件的暗电流主要集中在结区以及电极附近, 主要是产生复合电流以及扩散电流等体内暗电流为主, 表面漏电相比之下很小, 器件的品质因子保持在一个良好的水平; 当表面态到达 $2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$, 电极之间开始有轻微的反型沟道, 这是表面漏电还是以复合电流为主, 当表面态继续增加, 沟道会迅速增大, 品质因子迅速减小并趋向于 0; 当到达 $8 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 时, 沟道完全开启, 探测器呈现电阻特性, 器件的暗电流基本全部为表面沟道电流, 品质因子接近于 0, 器件性能完全丧失。由图 6 可以看出表面态小于 $2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 时, 器件都会有一个良好的性能。

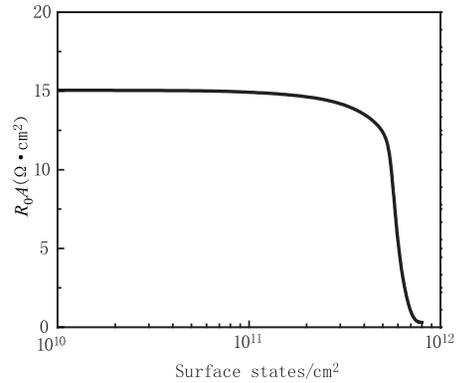


图 6 R_0A 和表面态密度的关系

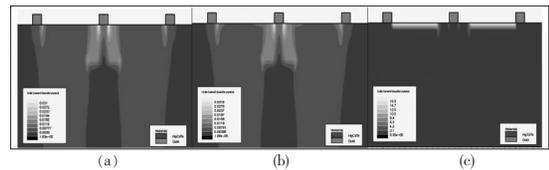


图 7 不同表面态密度的暗电流分布

- (a) 表面态密度 $1 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 时暗电流分布;
- (b) 表面态密度 $2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 时暗电流分布;
- (c) 表面态密度 $8 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 时暗电流分布

3.4 p 区受主浓度

首先, 仿真假定改变 p 区受主浓度, 不会产生任何缺陷, 研究暗电流和 p 区受主浓度的关系: 随着浓度的上升, 虽然 p 区电子的寿命下降, 但是 p 区的电子浓度同时也会大幅减小, p 区浓度增加会使电子浓度下降, 最后经过仿真计算, R_0A 增加, 如图 8 所示, 在器件在 p 区受主浓度大于 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 的情况下能保持一个较好的数值。

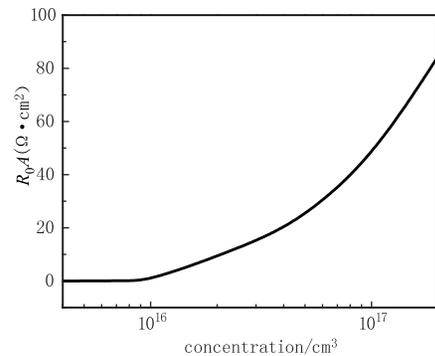


图 8 R_0A 和 p 区受主浓度的关系

但是一方面增加 p 区受主浓度需要改变退火等工艺条件, 这些改动可能会带来不利的影响: 如增加激活的杂质浓度, 增加 Hg 空位缺陷等, 这些都会导致暗电流上升, 使得器件性能变差, 而这方面变化是现有仿真无法准确模拟的, 只能通过实际工艺来获得; 二是有些证据表明, 保持一个非常低的电子浓度, 会使得器件变得十分不稳定; 而且电子的浓度减小, 也会使得相应的光信号减小。所以 p 区的掺杂浓度的选择应该在 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以上, 根据具体工

艺水平和需求选择合适的浓度。

3.5 p 区厚度

p 区厚度与品质因子的关系如图 9 所示,在固定电压下的 pn 结的电阻可以近似的等效为两个电阻 R1、R2 的并联结构:以 n 区厚度为界,R1 为电流横向流过 pn 结的电阻;R2 为电流纵向通过 pn 结,流过 p 区底部的电阻,如图 10 所示,可见随着 p 区厚度的增加,实际上是增加 R2 横截面积,使得 R2 减小,减小了器件的并联电阻,暗电流上升,这和文献[9]的仿真结果类似,通过曲线发现,p 区厚度最好保持在 8 μm 以下,考虑到 n 型注入区的深度不容易控制,过低的 p 区厚度会造成 n 区直接导通,但一般的注入区深度不会超过 4 μm ,所以 p 区厚度以 5 ~ 8 μm 为宜。

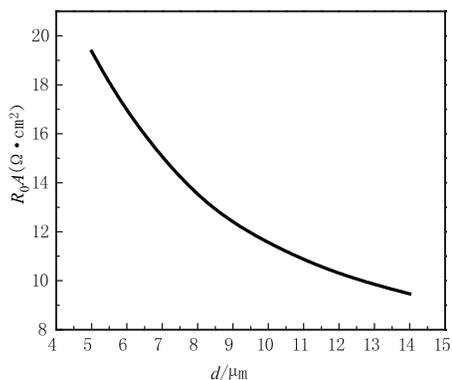


图 9 R_0A 和 p 区厚度的关系

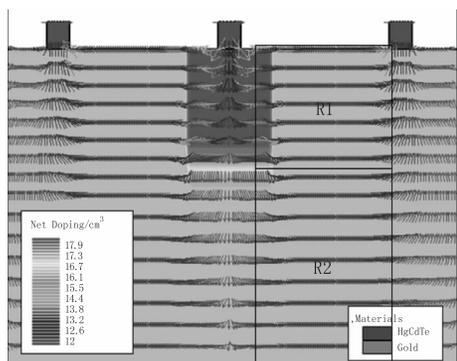


图 10 探测器等效电阻示意图(图中矢量为电流方向)

3.6 n 区尺寸

品质因子随着 n 区厚度及宽度的变化趋势如图 11 所示,等效模型同上,当 n 区厚度增加,实际上是减小 R1,增大 R2,两者互相作用,经过仿真:随着 n 区厚度的增加,动态电阻实际上是成一个波动下降的趋势(图 11(a));而增大注入区宽度,则会同时减小 R1、R2,品质因子会随着注入区的增大而减小(图 11(b)),这也和仿真结果相吻合,但是总体来说这个范围内,n 区的尺寸对器件的品质因子影响不大,对于注入区的尺寸设计可以优先考虑其他因素(如 MTF,串音等)。

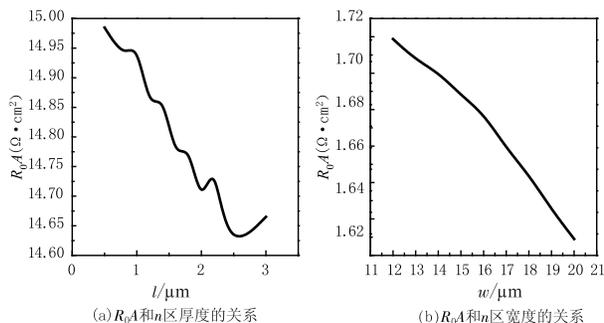


图 11 R_0A 和 n 区尺寸的关系

4 总结

运用 silvaco 半导体软件仿真计算了不同参量对暗电流的影响,得出了较好的范围,并对重要参量,针对器件的电流分布,复合速率分布,载流子分布进行了模拟分析,模拟时特别注意了简化模型和实际器件的区别,考虑了实际工艺水平的影响。计算表明 R_0A 是随着载流子寿命的减小而减小;随着深能级缺陷,表面态密度的增加而减小;p 区受主浓度增加,p 区厚度减小,n 区厚度和深度的减小会使 R_0A 增加。实际上要获得较低的暗电流,尽量控制缺陷密度低于 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$;表面态密度低于 $2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$;载流子寿命高于 10ns;p 区受主浓度结合工艺水平控制在 $2 \times 10^{16}/\text{cm} \times 3$ 以上,p 区厚度控制在 5 ~ 8 μm 。n 区尺寸对暗电流影响较小,可以优先考虑其他因素。

参考文献:

- [1] A Rogalski. New material systems for third generation infrared detectors[J]. Proc. of SPIE, 2009, 7388: 73880J - 1 - 73880J - 12.
- [2] Philippe Tribolet, Michel Vuillermet, David Billon Lanfrey. MCT IR detectors in france [J]. Proc. of SPIE, 2011, 8012: 801235 - 1 - 201235 - 12.
- [3] Yue Tingting, Yin Fei, Hu Xiaoming. Characterization analysis of dark current in HgCdTe/Si photodiodes [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(增刊): 931 - 934. (in Chinese)
- [4] 岳婷婷,殷菲,胡晓宁. 硅基 HgCdTe 光伏器件的暗电流特性分析 [J]. 激光与红外, 2007, 37(增刊): 931 - 934.
- [5] Shi Xiaoguang. Infrared physics [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [6] 石晓光. 红外物理 [M]. 北京:兵器工业出版社, 2006.
- [7] Rais M H, Musca C A, Antoszewski J, et al. Characterisation of dark current in novel $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ mid-wavelength infrared photovoltaic detectors based on n-on-p junctions

- formed by plasma-induced type conversion [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 214/215: 1106 – 1110.
- [6] Saxena P K, Chakrabarti P. Computer modeling of MWIR single heterojunction photodetector based on mercury cadmium telluride [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52(5): 196 – 203.
- [7] Gopal V, Singh S K, Mehra R M. Analysis of dark current contributions in mercury cadmium telluride junction diodes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43(6): 317 – 326.
- [8] P K Saxena, P Chakrabarti. Analytical simulation of HgCdTe photovoltaic detector for long wavelength infrared (LWIR) applications [J]. *Optoelectronics and advanced materials*, 2008, 2(3): 140 – 147.
- [9] Xu Xiangyan, Lu Wei, Chen Xiaoshuang, et al. Numerical simulation of long wavelength photovoltaic HgCdTe photodiodes [J]. *Journal of infrared and millimeter waves*, 2006, 25(4): 251 – 256. (in Chinese)
- 徐向晏, 陆卫, 陈效双, 等. 光伏型长波 HgCdTe 红外探测器的数值模拟研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(4): 251 – 256.
- [10] Weida Hu, Xiaoshuang Chen, Zhenhua Ye. Accurate simulation of temperature-dependent dark current in HgCdTe infrared detectors assisted by analytical modeling [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, 39(7): 981 – 985.
- [11] W D Hu, X S Chen. Analysis of temperature dependence of dark current mechanisms for longwavelength HgCdTe photovoltaic infrared detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105: 104502.
- [12] Kocer H, Arslan Y, Besikci C. Numerical analysis of long wavelength infrared HgCdTe photodiodes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(17): 49 – 55.