

文章编号:1001-5078(2018)08-1009-05

· 红外材料与器件 ·

不同电极尺寸对光电二极管电流的影响

祁娇娇, 赵 凯

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 基于 Sentaurus TCAD 软件对 n-on-p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 红外探测器器件结构进行建模, 并在不同电极尺寸条件下对器件的光电流进行仿真。通过仿真发现随着像元电极尺寸的减小, 光电二极管反向电流也逐渐减小。针对这一现象从金属层对冶金结电势分布的影响和被吸收的光子数目 Q 两个角度进行了分析。金属层对半导体材料表面的电势分布具有调制作用, 随着电极尺寸的减小, 二极管的反向电流减小; 随着像元电极尺寸的减小, 被吸收的光子数目减小, 导致光电二极管反向电流减小; 以上两个方面都会引起光电二极管电流随着电极尺寸的减小而减小。

关键词: $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$; 电极尺寸; 反向电流; 光电二极管

中图分类号: TN214 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.08.012

Influence of different electrode sizes on photoelectric diode current

QI Jiao-jiao, ZHAO Kai

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

Abstract: This paper models a device structure of n-on-p $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ infrared detector by means of Sentaurus TCAD. Currents in different electrode sizes are simulated. Through simulation it is found that reverse current of photoelectric diode gradually decreases with the decrease of the electrode size. This paper analyzes the phenomenon from two aspects, metal layer's effects on the electric potential distribution and the number of photons (Q) absorbed. The metal layer has a modulation effect on electric potential distribution and Q . The two causes result in that the current decreases with the decrease of electrode size.

Key words: $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$; electrode sizes; reverse current; photoelectric diode

1 引 言

HgCdTe 是一种 II-VI 族窄禁带化合物半导体, 在短波、中波、长波和甚长波等各个红外波段均为主流的红外探测器材料, 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^[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 (77 K), 具有很高的探测性能, 在过去的 50 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

作者简介: 祁娇娇 (1988 -), 女, 助理工程师, 主要研究方向为红外探测器芯片制备。E-mail: qjj_711@163.com
收稿日期: 2017-09-10; **修订日期:** 2017-11-09

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]。目前对碲镉汞红外探测器的研究已经取得很大成果,但像元金属层尺寸对器件电学参数的影响却鲜有报道。

由于 HgCdTe 材料自身的性质及工艺的特殊性,影响探测器性能的参数较多,工艺过程波动大,实验数据难以真实反映其性能。目前可以通过软件模拟的方式对 HgCdTe 材料和器件进行仿真模拟,排除工艺过程中工艺波动带来的影响,缩短工艺验证周期,极大地节约了金钱和时间成本^[5-7]。本篇文章基于 TCAD Sentaurus 半导体仿真软件,针对 HgCdTe 长波探测器的像元尺寸对器件电流的影响进行仿真模拟,分析了光伏型红外探测器的工作原理,建立相应长波器件二维模型,分析了不同电极尺寸条件对器件电流的影响,并对影响机理进行了分析,并得出系列结果,为器件电极尺寸的设计工艺奠定了基础。

2 数值模型

2.1 光伏器件简介

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 是三元化合物半导体材料,光伏器件由 p-n 结组成,如图 1 所示^[8]。

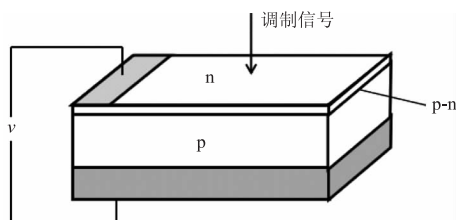


图 1 光伏器件结构图

Fig. 1 Structure of a photoelectric device

从图中可以看出 p 区为器件的吸收层, p 区与 n 区形成 pn 结,光伏器件的主体结构为 pn 结。辐射的红外信号在器件中被吸收后,在 p-n 结中或者在 p 区、n 区产生非平衡的电子空穴对, p 区、n 区产生非平衡的电子空穴对向 p-n 结扩散,并在 p-n 结的空间电场中运动,从而导致 p-n 结表面势的变化,对外电路贡献光电流。基于 n-on-p 的器件结构进行分析,二极管的总电流 I_t 由光生电流 I_p 加上暗电流 $I_d(V)$ 组成:

$$I_t = -I_p + I_d(V) \quad (1)$$

理想情况下暗电流是:

$$I_d(V) = I_0 \left(\exp \frac{eV}{k_B T} - 1 \right) \quad (2)$$

其中, I_0 是二极管的饱和电流; e 是元电荷电量; V 是 np 电极之间的电压值; k_B 是玻尔兹曼常数; T 是二极管的工作温度。光电流密度可以表达为:

$$J_p = e\eta Q \quad (3)$$

其中, η 是器件的量子效率; Q 是被吸收的少数载流子数目。

2.2 器件结构模型

首先利用 Structure Editor 界面进行器件结构的设计和有限元网格的划分,器件结构剖面图如图 2 所示。在 P 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 衬底 (P-body) 上进行离子注入形成 PN 结。P-body 区、 N^+ 区的 Cd 组分值 x 一致,该 PN 结为同质平面结, $x = 0.22$ 。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 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 表面态作为边界条件简化,结区载流子分布简化为均匀分布, P 和 N 字母代表 P-body 区和 N^+ 区电极,材料及器件结构具体参数如表 1 所示。

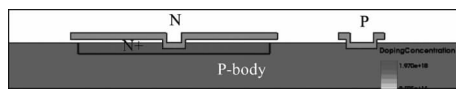


图 2 光电二极管剖面图

Fig. 2 Profile structure of photoelectric diode

表 1 材料及器件结构模拟参数

Tab. 1 Simulation parameters of material and device

参数	数值
截止波长/ μm	9.5
x	0.22
N 区掺杂浓度/ cm^{-3}	1×10^{18}
P 区掺杂浓度/ cm^{-3}	3×10^{16}
Z 轴宽度/ μm	0.1
器件工作温度/K	77
N 区深度/ μm	1.5
P 区厚度/ μm	6
边界反射系数	1

2.3 材料特性参数

设计好器件基本模型后,还要在材料库中定义材料参数, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 作为 II VI 族化合物半导体,

它的各项材料参数如下:

1) 能带

$$E_g = -0.302 + 1.93 \times x - 0.810 \times x^2 + 0.832 \times x^3 + 5.354 \times 10^{-4} (1 - 2 \times x) \left\{ \frac{(-18.22 + T^3)}{255.2 + T^2} \right\} \quad (4)$$

其中, x 是 Cd 组分比例; T 是晶格温度。

2) 电子亲和能

$$\chi = 4.23 - 0.813 \times (E_g(T) - 0.083) \quad (5)$$

3) 介电常数

$$\varepsilon = 20.5 - 15.5 \times x + 5.7 \times x^2 \quad (6)$$

4) 电子空穴有效质量

$$\frac{m_e}{m_0} = \left[-0.6 + 6.333 \times \left(\frac{2}{E_g(T)} + \frac{1}{E_g(T) + 1} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

$$\frac{m_h}{m_0} = 0.55 \quad (8)$$

5) 电子空穴迁移率

$$\mu_e = 9 \times 10^8 \left(\frac{0.2}{x} \right)^{7.5} T^{-2 \left(\frac{0.2}{x} \right)^{0.6}} \quad (9)$$

$$\mu_h = 0.01 \times \mu_e \quad (10)$$

3 仿真结果及分析

3.1 仿真结果

本文基于上述材料及器件结构参数,在不同电极尺寸条件下,对器件结构进行仿真。图3是不同电极尺寸条件下的器件结构。

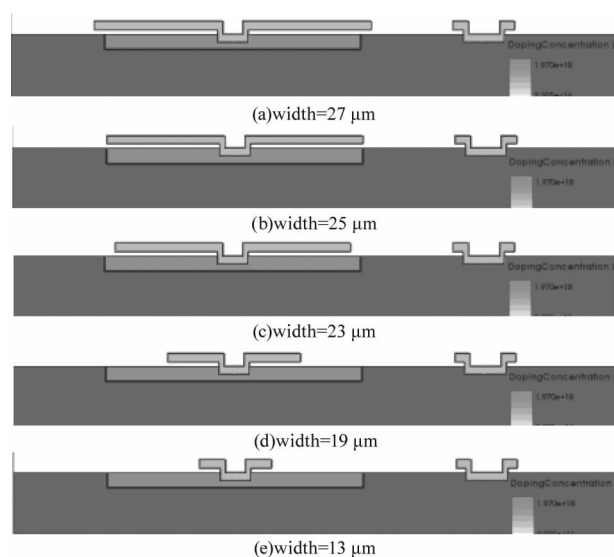


图3 不同电极尺寸条件下器件结构图

Fig. 3 Structures of device under different electrode sizes condition

根据以上器件结构,不同电极尺寸条件下分别进行对二极管电流进行仿真。在电流-电压曲线的仿真过程中,对器件的背面采用红外光照模式^[9],入射光波长为 $9.5 \mu\text{m}$,入射光能量密度为 0.01 W/cm^2 。不同电极尺寸条件下,器件电流-电压的仿真结果如图4所示。从图中可以看出当随着电极宽度从 $27 \mu\text{m}$ 减小到 $7 \mu\text{m}$ 的过程中,二极管反向电流的绝对值从逐渐减小。

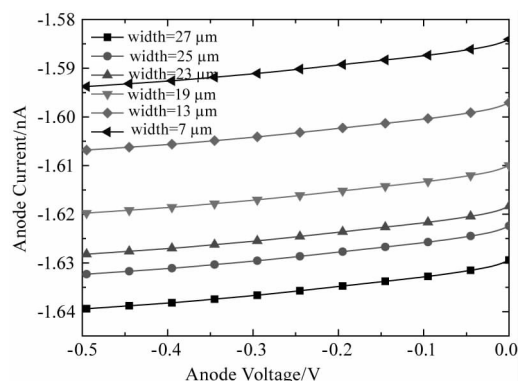


图4 不同电极尺寸条件下二极管电流随偏压的变化曲线

Fig. 4 Diode current versus voltage under different electrode sizes condition

3.2 结果分析

从上述仿真结果可以看出不同金属层尺寸对二极管反向电流具有较大的影响。从2.1节光伏器件的简介可以知道,光伏二极管工作的原理是当红外信号照射在半导体材料的表面时,以光子的形式进入到半导体体内,并被半导体材料吸收,被吸收的光子数目越多在 p-n 结中或者在 p 区、n 区产生的非平衡电子空穴对就越多。因此,被吸收的光子数目的多少是影响光电二极管电流的关键参数。另外, p 区、n 区产生的非平衡空穴电子对需要向 pn 结扩散才可对外电路贡献光电流。冶金结作为 pn 结内 P 型掺杂与 N 型掺杂的分界面,其附近电势的变化直接影响电子空穴对的扩散密度,进而影响扩散电流的大小。

基于上述分析,本文从金属层对冶金结电势分布的影响和被吸收的光子数目 Q 两个角度分析光电二极管电流随电极尺寸变化的原因。

3.2.1 金属层对冶金结电势的影响

在本文的器件结构中,金属层与半导体表面接触形成等势体,金属层可以分散器件表面的电势分布,等势体的电势由半导体器件表面的电势决定;金属层尺寸的变化会使器件表面的寄生电容发生变化,使得电势对器件的影响由器件表面转移到绝缘层中,金属层的变化导致器件冶金结附近的电势发生变化,冶金结附近扩散电流随冶金结处电压值成指数变化^[10],因此,冶金结处电压值的变化会引起二极管电流较大的变化。

图5是不同电极尺寸条件下冶金结附近电势分布变化图。从图中可以看出随着电极尺寸的减小,冶金结附近的电势减小,电极和体区的电势差减小,扩散电流随冶金结处电压值成指数减小,即结区吸收的少数载流子数目减小,光电二极管的对外电路贡献的光电流减小。

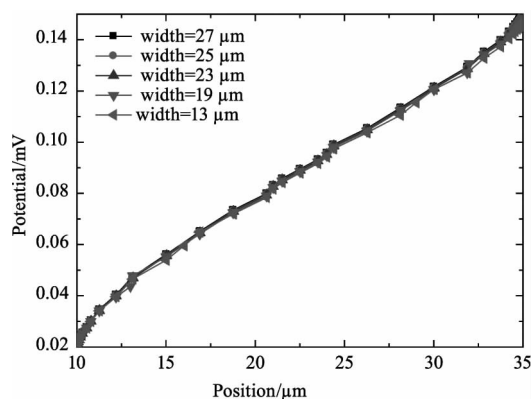


图5 不同电极尺寸条件下冶金结电势分布
Fig. 5 Electric potential distribution under different electrode sizes condition

3.2.1 金属层对被吸收光子数目 Q 的影响

光伏二极管工作时产生的电流是由半导体材料吸收光子产生光生载流子,半导体吸收的光子数目直接决定了光生电流的大小。由公式(1)和式(3)可知,光电二极管电流的大小正比于被吸收的光子数目 Q 。

图6是不同电极尺寸条件下,金属层下方吸收层被吸收光子数目的分布图。从图中可以看出随着电极尺寸的减小,被吸收的光子数目 Q 减小。因此随着金属层尺寸的减小,二极管的反向电流减小。

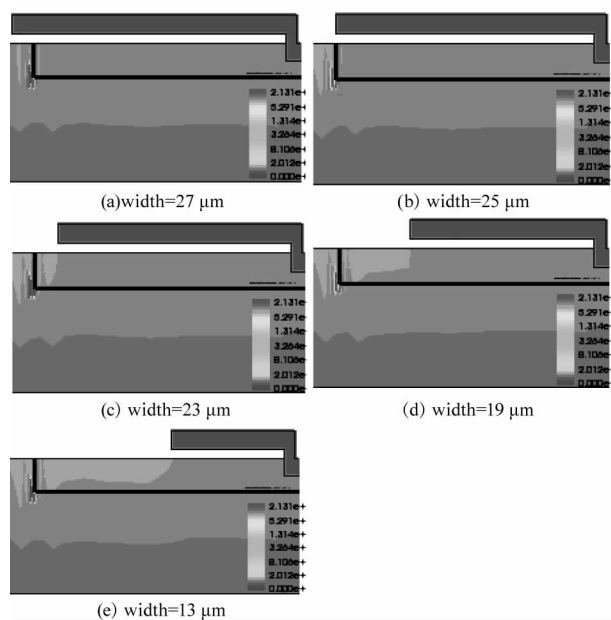


图6 不同电极尺寸条件下被吸收光子数目分布图

Fig. 6 Q values under different electrode sizes condition

4 总 结

本文使用 Sentaurus TCAD 软件对碲镉汞光电二极管进行了二维建模,并对不同电极尺寸条件下的光电流进行仿真;从仿真结果可以看出,随着电极尺寸的减小,二极管的光电流减小。本文从金属层对冶金结电势分布的影响和被吸收的光子数目 Q 两个角度进行了分析。电极和半导体接触形成等势体,对器件内电势分布具有一定的调制作用,冶金结附近的电势随着电极尺寸的减小而减小;不同电极尺寸条件下被吸收的光子密度不同,发现随着电极尺寸的增大,被吸收的光子数目减小,导致光电流减小。因此随着电极尺寸的减小,碲镉汞光电二极管的光电流逐渐减小。仿真结果对工艺具有指导性的作用,为器件的电极工艺设计奠定了基础。

参考文献:

- [1] A Rogalski. New material systems for third generation infrared detectors[J]. Proc. of SPIE, 2009, 7388: 73880J.
- [2] Philippe Tribolet, Michel Vuillemet, David Billon Lanfrey. MCT IR detectors in France[J]. Proc. of SPIE, 2011, 8012: 801235.
- [3] ZENG Gehong. Performance HgCdTe infrared detector at different temperatures[J]. Infrared Technology, 2012, 34

- (1):1-15. (in Chinese)
- 曾戈虹. HgCdTe 红外探测器性能分析[J]. 红外技术 2012,34(1):1-15.
- [4] 石晓光. 红外物理[M]. 1 版. 北京:兵器工业出版社,2006.
- [5] 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.
- [6] XU Xiangyan,LU Wei,CHEN Xiaoshuang,etc. Numerical simulation of long wavelength photovoltaic HgCdTe photodiodes [J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 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.
- [7] 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.
- [8] 褚君浩. 窄禁带半导体物理[M]. 1 版,北京:科学出版社,2005.
- [9] ZHAO Hua. Backside-illuminated HgCdTe/CdTe photodiodes[J]. Laser & Infrared, 1979,9(8):46-48. (in Chinese)
- 昭华. 背面照射型 HgCdTe/CdTe 光电二极管[J]. 激光与红外,1979,9(8):46-48.
- [10] 陈星弼. 晶体管原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2007.