

文章编号:1001-9014(2007)03-0164-06

中波双色光伏型 HgCdTe 红外探测器模拟研究

徐向晏, 叶振华, 李志锋, 陆卫

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要:基于二维数值模型,对光伏型中波(MW1/MW2)HgCdTe 双色红外探测器作了模拟计算,器件采用 n-p-p-p-n 结构、同时工作模式.计算了双色器件光谱响应及量子效率,重点分析了两个波段间的信号串音问题,以及高组分势垒层的作用.模拟结果显示,MW1(中波1,波长较短)对 MW2(中波2,波长较长)的串音是辐射透过 MW1 区在 MW2 区中吸收引起的,串音与光吸收比近似成正比,而载流子扩散效应可以忽略不计.高组分阻挡层对载流子扩散引起的串音有显著的抑制作用,如果没有势垒层,载流子扩散引起的串音十分明显,甚至成为串音的主导因素.对于 $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ 探测单元 MW1 和 MW2 的结电容大约为 1.75pF/pixel .

关键词:碲镉汞;中波双色红外探测器;光谱响应;串音;结电容

中图分类号:TN36 **文献标识码:**A

NUMERICAL MODELING OF MIDDLE WAVELENGTH TWO-COLOR PHOTOVOLTAIC HgCdTe DETECTORS

XU Xiang-Yan, YE Zhen-Hua, LI Zhi-Feng, LU Wei

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: The performance of two-color middle wavelength infrared photovoltaic HgCdTe detector was simulated numerically based on a two-dimensional model. The structure of n-p-p-p-n was designed in simultaneous mode. The spectral response, quantum efficiency, and junction capacitance were calculated, and the crosstalk between two bands and the function of barrier layer were analyzed in detail. The calculation results show that the infrared radiation transmitted through MW1 (shorter wavelength in middle wavelength band) diode can be absorbed in MW2 (longer wavelength in middle wavelength band) diode, and this causes MW1-to-MW2 crosstalk. The crosstalk is linearly depended on the ratio of radiation absorbed in MW2 diode to that in MW1 diode. The barrier layer can remarkably suppress the crosstalk caused by photocarriers diffusion. Without the barrier layer, the MW1-to-MW2 crosstalk will increase as large as 10 times, and is dominated by photocarriers diffusion. The junction capacitance of MW1 and MW2 diode is about 1.75fF/pixel for $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ detector.

Key words: HgCdTe; two-color infrared detector; spectral response; crosstalk; junction capacitance

引言

随着红外探测成像技术的发展,单波段(单色)成像系统日益完善,对多波段(或多色,包括双色)成像系统的迫切需求已提上日程.多色系统提供两个波段以上的信息,可以抑制目标的复杂背景,根据多波段信号,能够提取目标绝对(真实)温度,因此在目标辨认、信号识别及抗干扰方面性能优于单色探测器,在地球物理、卫星遥感、军事预警跟踪方面有重要应用价值.传统的多色探测系统由分光器和

多个单色探测器阵列组成,体积、重量、功耗都比较大,需要额外的图象合成技术.单片集成多色探测成像系统从根本上克服了这些缺点,而且多波段图象像素自然形成精确对准,可靠性高,外围设备简单,是多色探测成像技术发展的方向^[1].

HgCdTe 半导体量子效率高,响应波长随组分可调,是制备多色探测器的优选材料. HgCdTe 双色探测器有顺序工作模式和同时工作模式两种器件构型^[1].顺序工作模式每个探测单元只需一个输出电极(另一个是整个阵列的公共电极),探测波段根据

收稿日期:2006-10-30,修回日期:2007-03-07

Received date: 2006-10-30, revised date: 2007-03-07

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(2004CB619004),国家自然科学基金资助项目(10234040, 60244002)

作者简介:徐向晏(1973-),男,甘肃岷县人,博士,从事半导体器件设计和模拟研究.

偏置电压选择工作二极管确定,每个波段分时工作,器件结构较为简单;同时工作模式每个探测单元需要两个电极,每个波段同时工作,器件结构较为复杂.后者真正实现了双波段的同时探测,光谱串音低.但为了满足双色探测技术要求,相对单色器件而言,双色器件在结构、工艺和性能控制方面都更为困难^[2,3],仿真模拟计算成为双色器件性能预测、优化、和器件成本降低的有效手段,对器件制备有重要参考价值.

Jo^[4]、Jozwikowski^[5]等人对双色器件作了模拟研究,然而根据我们所知的文献资料,目前还没有关于双色探测器串音和阻挡层作用详细定量研究工作的报导.本文建立二维模型,模拟计算中波双色器件(MW1/MW2)性能,采用典型的 n-p-p-p-n 结构^[6,7],同时工作模式,背照射方式,考查器件的光谱响应,重点分析了两个波段(MW1 与 MW2)之间的信号串音问题,以及势垒层的作用,最后给出了器件 R_0A 积及结电容,为双色探测器的研制提供参考.

1 理论方法及数值模型

半导体器件的数值模拟一般是根据边界条件联立自治求解泊松方程、电子与空穴的连续性方程以及电流输运方程^[8];另外,光照条件按照载流子产生率直接加入方程,如果需要考虑隧道效应(如带间直接隧穿,穿过势垒的隧穿等),还应该加入与这些隧穿效应相关的方程自治求解.这些耦合的非线性偏微分方程,可根据有限元方法在器件界定区域离散化形成非线性方程组,然后用牛顿法等方法进行求解.

图 1(a)是中波 n-p-p-p-n $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 双色探测器单元剖面结构示意图,由两个背靠背 pn 结二极管组成,中间用高组分阻挡层分开.被探测红外辐射通过衬底入射,其中波长较短的中波部分(MW1 波段,中波 1)由最先遇到的 MW1 异质结吸收并产生光电流,信号由电极①和阵列公共电极③输出;波长较长的中波部分(MW2 波段,中波 2)在 MW1 中不吸收,透过 MW1 后,被 MW2 同质结吸收,产生的光电流信号由电极①和电极②输出.这样,两个波段的信号可经过电极①和电极②输出,其中电极②输出 MW2 信号,电极①输出 MW1 和 MW2 信号之和(通过减法可得到 MW1 信号),电极③是整个阵列的公共电极.中间高组分势垒层的作用是防止中波 1 产生的光生载流子扩散到 MW2 区域形成信号串音.由于图 1(a)中的电极结构分布,对器件的模拟已无法采

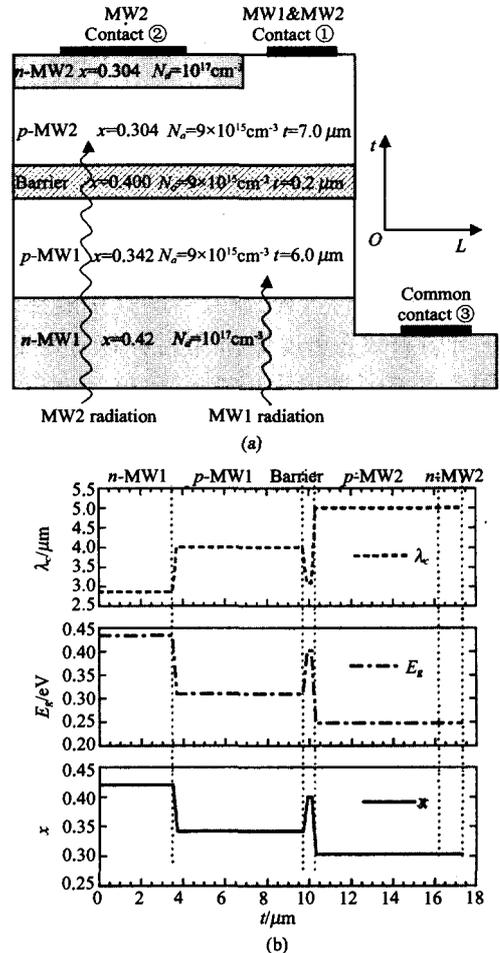


图 1 (a) n-p-p-p-n $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 双色探测器结构 (b) 器件中组分 x 、禁带宽度 E_g 及截止波长 λ_c 的变化(工作温度 77K)

Fig. 1 (a) Structure of n-p-p-p-n $Hg_{1-x}Cd_xTe$ two-color detector (b) profile of composition x , band-gap E_g and cut-off wavelength λ_c along thickness of detector (at 77K)

用一维模型,为此本文采用二维模型.

器件制备时先在衬底上生长 p-on-n 型异质结 MW1, p 区较厚作为吸收层;随后生长很薄的高组分 p 型势垒阻挡层;然后生长 p 型低组分 MW2 吸收层,并用离子注入法在部分区域形成 MW2 n 区,完成 MW2 pn 结;最后刻蚀分离探测单元,钝化并制备欧姆电极,通过互连工艺得到探测器.通过上述方法制备的双色探测器, MW1 占空比接近 100%, MW2 占空比降低,考虑到实际制备工艺,计算中 MW2 占空比取 75%^[7].图 1(b)给出器件沿厚度方向组分、禁带宽度及对应截止波长的变化关系,设计目标是实现 MW1(3.0 ~ 4.0 μm)/MW2(4.4 ~ 5.0 μm) 双波段探测.

计算中假定辐照度 0.02 W/m² 的红外辐射从背

面(衬底)入射. 选用典型的掺杂浓度: p 区受主浓度 $9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, n 区施主浓度 10^{17} cm^{-3} , 电子 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合寿命 5 ns, 空穴 SRH 复合寿命 $25 \mu\text{s}$, 工作温度 77 K, 计算结果按照 $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ 探测单元面积给出(不包括公共电极面积). $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料参数是组分 x 和温度 T 的函数, 根据文献作了仔细设置和更新^[9-12]. 计算中考虑了辐射、俄歇、SRH 三种复合过程, 以及带间直接隧穿效应; HgCdTe 导带有效态密度低, n 型材料容易处于简并状态, 因此载流子浓度采用费米-狄拉克分布. 考虑到器件中组分、掺杂浓度以及电场变化剧烈的区域对器件性能影响较大, 特别注意了这些区域的有限元分割, 以保证数值模型能充分反映器件的物理特性.

2 计算结果及分析

2.1 光谱响应

图 2 是计算得到的光谱响应和量子效率. 对于实际器件, 衬底可能选取不同的材料, 也可以采取增透措施减小辐射在入射面的反射损失, 因此衬底入射面透过率随制备工艺和后处理过程而有所差别. 为了使计算结果具有通用性, 本文不考虑辐射在衬底入射面的反射损失, 认为辐射全部入射至 HgCdTe 层, 而根据实际器件的衬底透过率, 容易对此作以校正. 图 2 中二极管有较为平坦的响应峰, 响应边缘比较陡峭, MW1 和 MW2 光谱响应 50% 对应的截止波长分别为 $4.09 \mu\text{m}$ 、 $5.14 \mu\text{m}$ (稍大于图 1(b) 中各自吸收区禁带宽度对应的波长), 达到预先设计目的. 光谱响应是等辐照度条件, 而量子效率是等光子流量条件, 在相同辐照度下波长越长光子流量越大, 因此图 2(a)、(b) 曲线形状有一定差别. 中波 2 量子效率低于中波 1 的主要原因是 MW2 pn 结占空比 (75%) 低于 MW1 pn 结 (100%). 另外, 辐射沿厚度方向不是均匀吸收, 而是按指数函数下降, MW1 对辐射吸收的主要区域更靠近结区, 光生载流子输运效率高; 相比之下, MW2 对辐射吸收的主要区域远离结区, 光生载流子输运效率较低. 基于上述两方面原因, MW2 量子效率低于 MW1.

在截止波长 $4.0 \mu\text{m}$ 、 $5.0 \mu\text{m}$ 附近, 量子效率迅速降低是由于吸收系数下降引起的(带边吸收). 在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 之间的短波区域, MW1 量子效率随波长变短快速下降, 这与波长变短吸收系数增大, 量子效率应该增加的趋势相反. 实际上, 光伏器件量子效率与少数扩散长度直接相关, MW1 异质结 n 区组分比 p

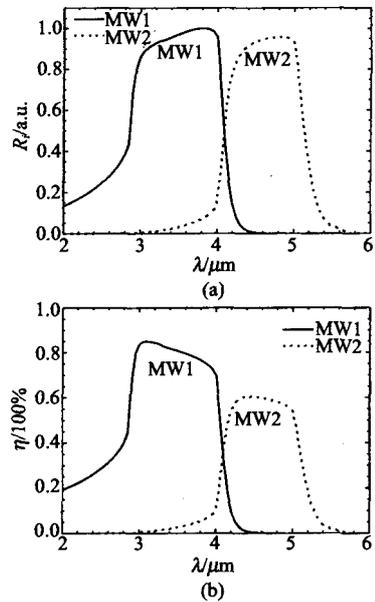


图 2 双色探测器光谱响应 (a) 相对光谱响应 R_i (b) 量子效率 η

Fig. 2 Calculated two-color spectral response (a) relative spectral response R_i (b) quantum efficiency η

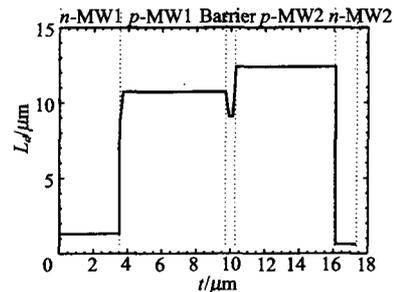


图 3 双色器件中少数扩散长度 L_d

Fig. 3 Minority carriers' diffusion length L_d in two-color detector

区高, 禁带宽度对应的波长为 $2.86 \mu\text{m}$ (图 1(b)), $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 辐射照射时, 大部分被 MW1 n 区吸收并产生光生载流子, 进入 p 区的辐射较少; 而 n 区少数子是空穴, 扩散长度很小(如图 3 所示), 大部分光生空穴在到达 MW1 结区时已经复合, 因此量子效率较低. 随着波长增大, 透过 MW1 n 区而被 p 区吸收的辐射比例增加, 在 p 区产生的光生载流子增多, 而 p 区少数子是电子, 扩散长度长, 大多数光生电子可以到达结区, 因此量子效率增高.

2.2 串音

MW1 对 MW2 具有滤波和窗口作用, 从衬底照射的红外辐射先经过 MW1 区吸收, 未被吸收的剩余部分再在 MW2 区吸收, 因此器件沿厚度方向辐射能量分布不均匀, 图 4(a) 给出这种相对能量分布. 根据辐射波长长短和各区域组分高低, 波长短于

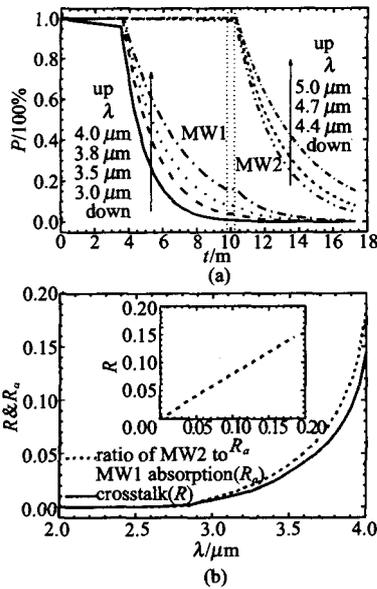


图 4 信号串音与光吸收的关系 (a) 沿器件厚度方向辐射能量密度的相对分布 P (b) MW1 对 MW2 的信号串音 R 与辐射在 MW2 和 MW1 区域吸收之比 R_a 的关系

Fig. 4 Relation of crosstalk and light absorption (a) relative light power density (P) along the thickness of device (b) relation of the crosstalk of MW1 to MW2 (R) and the ratio of MW2 to MW1 absorption (R_a)

$4\mu\text{m}$ 的辐射主要在 MW1 区吸收, 形成 MW1 响应峰; 少量未被吸收而透过 MW1 的辐射, 入射至 MW2

区被吸收, 形成图 2 中 MW2 在波长短于 $4\mu\text{m}$ 波段的响应, 后者对前者的比值就是 MW1 波段对 MW2 波段的信号串音. 波长大于 $4\mu\text{m}$ 的辐射在 MW1 区有只少部分被吸收 (带边吸收), 形成 MW1 对较长波段的光响应; 大多数未被吸收而透过, 入射至 MW2 区被吸收, 形成 MW2 响应峰; 同样, 前者对后者的比值就是 MW2 波段对 MW1 波段的信号串音.

根据设计目标, 我们只关心波段 ($3.0 \sim 4.0\mu\text{m}$)/($4.4 \sim 5.0\mu\text{m}$) 内的信号串音. 从图 2 中可以看出, 在 ($4.4 \sim 5.0\mu\text{m}$) 范围内, MW2 对 MW1 的串音很小, 可以不予考虑; 相比之下, ($3.0 \sim 4.0\mu\text{m}$) 的 MW1 波段对 MW2 的串音比较显著, 影响器件性能, 设计时必须予以考虑. 根据上面的讨论, MW1 波段对 MW2 的串音, 与辐射被 MW2 区域吸收的比例有关, 比例越高, 串音越严重, 图 4 (b) 给出串音与吸收比之间的关系, 二者随波长的变化关系基本一致; 进一步分析显示, 串音近似正比于吸收比, 比例系数大约为 0.8, 这与 MW2/MW1 在响应波段内量子效率比值, 以及二者 pn 结面积比值 (0.75), 都相当接近. 吸收的辐射产生光生载流子, 经过输运过程才能转化为有效信号, 总的转化效率就是量子效率, 不难理解这些系数之间的内在联系. 因此根据双色器件

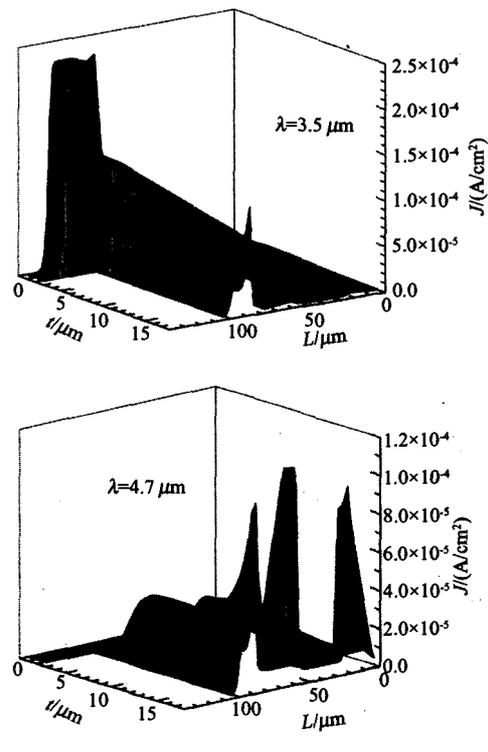
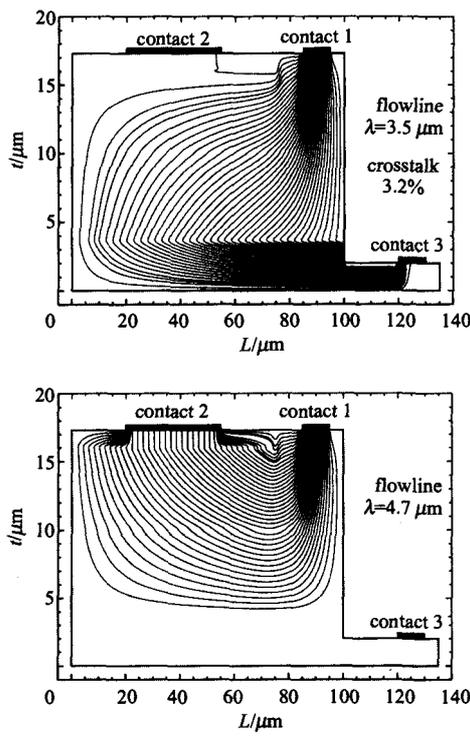


图 5 器件中的光电流分布 (a) $\lambda = 3.5\mu\text{m}$ (b) $\lambda = 4.7\mu\text{m}$
Fig. 5 Distribution of photocurrent in device (a) $\lambda = 3.5\mu\text{m}$ (b) $\lambda = 4.7\mu\text{m}$

两区域对辐射能量的吸收比和量子效率比,即可以估算串音.该结论提供了一种简便有效、较为准确的串音大小预估方法.

如果假定 MW2 区对中波 1 辐射不吸收,重新计算光电流,结果显示 MW1 对 MW2 的串音非常小,对于实际应用完全可以忽略不计,这再次证明上述串音原因的分析是正确的.既然串音只与辐射吸收有关,减少串音也只能从吸收方面考虑,增加 p-MW1 区的厚度可增加对中波 1 的吸收而减少透射的比例,是可以考虑的措施之一.

图 5(a)、(b)以 3.5 μm 、4.7 μm 辐射为 MW1、MW2 波段的代表,给出不同辐射照射时器件中的光电流分布,图中清楚地显示了光电流在 3 个电极之间的分配关系.

2.3 势垒阻挡层的作用

根据上面的讨论,信号串音是由于本该在某一区域吸收的辐射却在另一区域被吸收引起的,如果没有这种吸收,则没有串音.得出该结论需要一个重要前提条件:在 MW1 区和 MW2 区之间有分隔二者的高组分阻挡层.从双色器件工作的物理过程分析,除了上面已讨论的辐射吸收外,载流子扩散同样可以引起信号串音.根据双色器件结构图 1(b),被 p-MW1 区吸收的中波 1 辐射,产生电子-空穴对,在其附近有 MW1、MW2 两个 pn 结,少子(电子)既有可能向 MW1 结区扩散,最终被电极 3 收集形成光电流信号;也有可能向 MW2 结区扩散,最后被电极 2 收集形成光电流,这一部分就是串音信号.但根据前面的计算结果,这种载流子扩散引起的串音很小,可以忽略不计,这得益于器件中间的高组分阻挡层.图 6 是器件平衡能带图,阻挡层在导带形成势垒,电子从 p-MW1 区向 p-MW2 区的扩散受到阻挡,使得绝大多数电子只能向 MW1 结区扩散,抑制了信号串音;由于 p-MW2 区导带位置比 p-MW1 区低,如果没有势垒层阻挡,电子很容易从 p-MW1 区向 p-MW2 区扩散,最终到达 MW2 结区,形成串音信号.图 7 是去掉阻挡层的器件,在 3.5 μm 辐射照射时光电流分布图,电极 2 有明显光电流输出,串音高达 31.2%;与照射波长相同但有高组分阻挡层的图 5(a)相比,串音增大 10 倍.在 MW1 波段的其它波长处,串音变化情况类似.由于厚度很薄(大约 0.2 μm),去掉高组分阻挡层对辐射吸收几乎没有影响,串音增加的部分只能是由于载流子(电子)扩散引起的.由此可见,高组分势垒层对 MW1 对 MW2 的串音有显著抑制作用,如果没有阻挡层,载流子扩

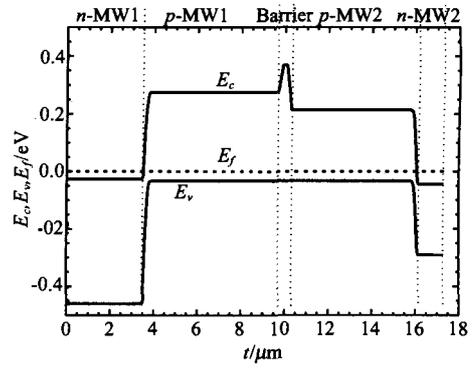


图 6 器件平衡能带图
Fig. 6 Energy band profile of detector in equilibrium

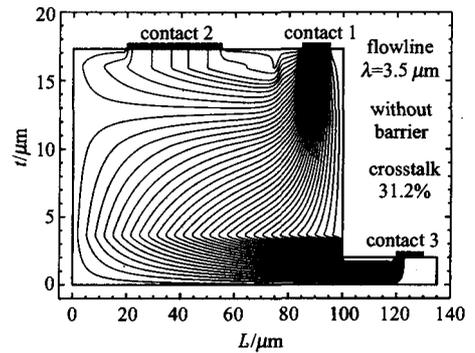


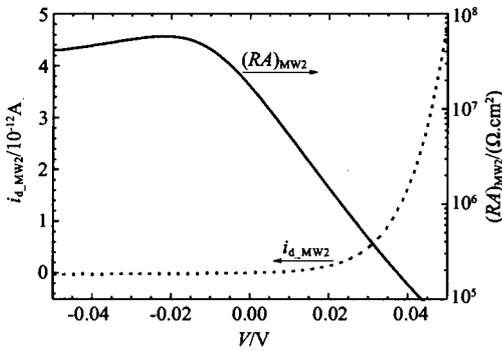
图 7 无阻挡层时器件中光电流分布($\lambda = 3.5 \mu\text{m}$)
Fig. 7 Distribution of photocurrent in detector without barrier layer($\lambda = 3.5 \mu\text{m}$)

散引起的串音将十分明显,甚至是串音的主导因素.图 6 中,器件 p-MW1 区与 p-MW2 区之间价带只有微小的突变起伏,基本是平坦的,对多子空穴的运输没有影响.

2.4 R_0A 积及器件电容

器件的暗电流或 RA 积反映了载流子各种复合过程的快慢,与噪声大小和探测率直接相关.图 8 是 MW2 pn 结的暗电流特性, R_0A 积大约为 $1.7 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$.关于 MW1 pn 结,由于暗电流很小,准确计算较为困难,从较高温度下的暗电流推算, R_0A 积应远在 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 之上.而组分相近的 pn 结 R_0A 积实验测量结果,分散范围较大, MW2 pn 结大约在 $(10^5 \sim 10^7) \Omega \cdot \text{cm}^2$ 左右^[1,6,7,11], MW1 pn 结大约在 $(10^7 \sim 10^8) \Omega \cdot \text{cm}^2$ 左右^[11].可见模拟计算值接近实验报道中的较高值,这可能是由于实际器件有不同的陷阱密度,以及表面复合等因素引起的.

实用的双色器件,读出电路必不可少,器件电容是读出电路必须考虑的参数.基于小信号原理,计算了 MW1 和 MW2 结电容,二者大致相同,分别为

图8 MW2 pn 结 $i_d - V$ 及 RA 积Fig. 8 Dark current and RA product of MW2 pn junction

1.77pF/pixel、1.75pF/pixel。组分相近的单个异质结,实验测得其结电容大约在 2pF/pixel 左右,可见计算结果与实验测量基本一致。从电路设计的角度分析,双色器件有 3 个电极需要考虑,计算显示各电极之间的关联程度有所不同。电极②主要与电极①关联,与公共电极③关联很小,在电极②上看到的电容基本就是 MW2 结电容,为 1.75pF/pixel;电极①与电极②和公共电极③同时相关,因此在电极①上看到的电容是 MW2、MW1 结电容之和,大约为 3.52 pF/pixel。在 1MHz 以内有平坦的电容-频率特性。

3 结论

通过建立二维数值模型,对光伏型中波 HgCdTe 双色红外探测器作了模拟计算,模型考虑了辐射、俄歇、SRH 三种复合机制,以及带间直接隧穿效应,载流子浓度采用费米-狄拉克分布。器件采用 n-p-p-p-n 结构,同时工作模式,背照射方式。计算了双色器件的光谱响应及量子效率,重点分析了两个波段间信号串音形成的物理机理,以及高组分阻挡层的作用。模拟结果显示,n-MW1 区少子扩散长度短是 MW1 短波方向量子效率降低的主要原因,占空比对 MW2 量子效率有直接影响。高组分势垒层对信号串音有显著的抑制作用。有势垒层时,MW1 对 MW2 的串音是由于中波 1 辐射透过 MW1 区在 MW2 区吸收引起的,串音与辐射在两个区域的吸收比近似成正比关系,而载流子扩散效应可以忽略不计。如果没有势垒层,载流子扩散引起的串音大大增加,甚至成为串

音的主导因素。对于实用器件,高组分阻挡层必不可少。模拟所得 MW2 pn 结 R_0A 积大约为 $1.7 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$,接近于文献报道中较高的实验结果。MW1、MW2 pn 结电容大约为 1.75pF/pixel,与组分相近的异质结实验测量结果基本一致。

REFERENCES

- [1] Rogalski Antoni. Infrared detectors; status and trends[J]. *Progress in Quantum Electronics*. 2003, 27: 59—210.
- [2] JIA Jia, CHEN Gui-Bin, GONG Hai-Mei, et al. Study on the junction of SWIR HgCdTe photo diodes at room temperature with laser beam induced current [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (贾嘉,陈贵宾,龚海梅,等. 室温短波碲镉汞结区的 IBIC 方法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24 (1): 11—14.
- [3] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Wing, CAI Wei-Ying, et al. Application of laser beam induced current for technology detecting of HgCdTe two-color detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华,胡晓宁,蔡伟颖,等. 激光束诱导电流在 HgCdTe 双色探测器工艺检测中的应用. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(6): 459—462.
- [4] Jo N H, Yoo S D, Ko B G, et al. Two-dimensional numerical simulation of HgCdTe infrared detectors [J]. *SPIE*, 1998, 3436: 50—60.
- [5] Jozwikowski K, Rogalski A. Computer modeling of dual-band HgCdTe photovoltaic detectors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 90(3): 1286—1291.
- [6] Ferret P, Zanatta J P, Hamelin R, et al. Status of the MBE technology at Leti LIR for the manufacturing of HgCdTe focal plane arrays [J]. *J. Electron. Mater.*, 2000, 29(6): 641—647.
- [7] YE Zhen-Hua, WU Jun, HU Xiao-Wing, et al. Study of integrated MW1/MW2 two-color HgCdTe infrared detector arrays [J]. *J. Infrared Millim Waves* (叶振华,吴俊,胡晓宁,等. 集成式 HgCdTe 红外双色探测器阵列. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(3): 193—196.
- [8] Selberherr Seigfried. Analysis and simulation of semiconductor devices [M], Austria: Springer-Verlag Wien New York Press, 1984, 41—42.
- [9] Chu Jun-Hao, Li Biao, Liu Kun, et al. Empirical rule of intrinsic absorption spectroscopy in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, 75(2): 1234—1235.
- [10] Schacham S E, Finkman E. Recombination mechanisms in p-type HgCdTe: Freezeout and background flux effects [J]. *J. Appl. Phys.*, 1985, 57(6): 2001—2009.
- [11] Rogalski Antoni, Adamiec Krzysztof, Rutkowski Jaroslaw. Narrow-gap semiconductor photodiodes [M], USA: SPIE Press, 2000, 15—82.
- [12] Shih C K, Spicer W E. Determination of a natural valence-band offset: the case of HgCdTe and CdTe [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(24): 2594—2597.