

文章编号: 1001-9014(2006)04-0251-06

# 光伏型长波 HgCdTe 红外探测器的数值模拟研究

徐向晏, 陆卫, 陈效双, 徐文兰

(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:**报道了光伏型长波  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.224$ ) n-on-p 红外探测器数值模拟研究的结果. 采用二维模型, 在背照射方式下, 以 p 区厚度、两电极间距离、结区杂质浓度分布、少子寿命为参量, 模拟计算了  $R_0A$  积、零偏光电流与这些参量之间的变化关系. 计算表明, 随 p 区厚度增加,  $R_0A$  积下降;  $R_0A$  积随电极之间距离增大而增加, 但量子效率随距离增大而降低, 电极之间最佳距离大约为  $100\mu\text{m}$ ;  $R_0A$  积和光电流对结区杂质浓度分布形状不敏感; 随少子(电子)寿命降低,  $R_0A$  积和光电流下降. 二维模型弥补了一维模型难以计算横向电流、电场的缺点.

**关键词:** HgCdTe; 长波红外探测器;  $R_0A$  积; 量子效率; 少子寿命

**中图分类号:** TB4      **文献标识码:** A

## NUMERICAL SIMULATION OF LONG WAVELENGTH PHOTOVOLTAIC HgCdTe PHOTODIODES

XU Xiang-Yan, LU Wei, CHEN Xiao-Shuang, XU Wen-Lan

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

**Abstract:** The performance of n-on-p long wavelength photovoltaic  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.224$ ) photodiodes was simulated numerically. Calculation was based on two-dimensional model for the backside-illuminated configuration. The influence of several factors, including p-type region thickness, the distance from p-type region contact to  $n^+$  area, n-side doping profile, and lifetime of electron, on  $R_0A$  product and zero-bias photocurrent was studied. Simulation results show that  $R_0A$  product decreases with increasing the thickness of the p-type region. As the distance from p-type region contact to  $n^+$  area increases,  $R_0A$  product increases, but quantum efficiency decreases, and the optimized distance is about  $100\mu\text{m}$ . The performance of photodiodes is strongly dependent on minority carrier (electron) lifetime, but n-side doping profile is less important. Two-dimensional model is capable of simulating transverse current compared with one-dimensional model, and more suitable for modeling actual device.

**Key words:** HgCdTe; long wavelength IR photodiodes;  $R_0A$  product; quantum efficiency; minority carrier lifetime

### 引言

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  红外探测器量子效率高, 工作温度范围宽, 响应波长随组分可调, 并覆盖了重要的大气窗口区域, 性能优良, 是目前应用最为广泛的红外探测器. 然而人们对  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料的了解还远不如 Si 材料, 制备高质量的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料及探测器, 提高器件产率、降低成本, 仍然是研究的重要方面. 因此器件的模拟研究, 可优化器件参数, 对指导工艺过程、降低成本有重要价值.

目前  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  探测器的模拟研究主要是采用

各种解析公式近似<sup>[1~4]</sup>, 而且仅限于一维模型, 虽然各物理量的含义、作用清晰, 但对器件的刻画并不精确细致. 实际的器件总是三维的, 除了一维模型可较好地进行分析的垂直于 pn 结的电流外, 还存在横向的电流、电场是一维模型无法考虑的; 对于两个电极都在同一边的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  器件来说, 该问题更加突出, 并已超出解析公式近似的一维模型处理的理论框架. 然而建立完整的三维模型相当复杂, 数值求解运算量大, 时间长; 相比之下, 如果采用二维模型, 可以处理横向电流、电场, 弥补一维模型的不足; 同时建立模型较三维容易, 数值求解运算量可以接受; 如

果模型恰当,可以反映横向电流、电场的主要部分,将三维模型与一维模型差别的重要部分包含在内.本文采用二维模型,在背照射方式下,对光伏型长波  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  红外探测器的  $R_0A$  积、光电流与 p 区厚度、电极间距离、结区杂质浓度分布以及少子寿命之间的关系等进行了数值模拟,为优化器件性能提供参考.

### 1 数值模型

器件的数值模拟主要是根据边界条件联立自恰求解泊松方程(1),电子与空穴的连续性方程(2),电流输运方程(3):

$$\text{div grad}\psi = \frac{q}{\epsilon}(n - p - C) \quad (1)$$

$$\text{div } \vec{J}_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = qR, \quad \text{div } \vec{J}_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = -qR \quad (2)$$

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E}_n + qD_n \text{grad}n, \quad \vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E}_p - qD_p \text{grad}p \quad (3)$$

其中  $\psi$  表示电势,  $q, \epsilon, t$  分别为基本电荷、介电常数、时间,  $n, p, C$  分别为电子、空穴和净掺杂浓度,  $\vec{J}_n, \vec{J}_p$  分别为电子、空穴电流密度,  $R$  为净产生率(复合率),  $\mu_n, \mu_p, D_n, D_p$  分别表示电子、空穴的迁移率、扩散系数,  $E_n, E_p$  为电子、空穴的有效电场. 另外还包括其它一些附加方程,如载流子速率分布方程等. 这些方程按照有限元方法在空间离散后形成非线性方程组,然后用求解非线性方程组的方法,如牛顿法进行迭代求解. 本文采用 crosslight 公司的半导体器件模拟专用软件 Apsys 进行数值计算,该软件具有数值稳定和计算速度高的特点.

计算中主要涉及的  $HgCdTe$  基本材料参数见表 1 所列. 数值模拟的器件结构如图 1(a) 所示, p 型  $HgCdTe$  外延层组分  $x=0.224$ , 吸收波长在长波范围, 探测器结构为 n-on-p 型, 功率密度  $10W/m^2$  的红外辐射从背面(衬底)入射(大约相当于温度 800K 黑体, 辐射孔径 8mm, 在 12cm 处的辐射功率密度). 计算中取典型的器件参量: p 区受主浓度  $10^{15} cm^{-3}$ ,  $n^+$  区厚度(结深)  $1\mu m$ , 工作温度 80K. 计算中对器件作了细致的有限元分割,尤其在掺杂浓度及电场变化剧烈的区域特别注意了单元划分,见图 1(b).

### 2 计算结果及分析

#### 2.1 p 区厚度

图 2 显示了 p 区厚度与  $R_0A$  积的关系. 计算中只考虑辐射复合和俄歇复合,忽略 SRH 复合(间接

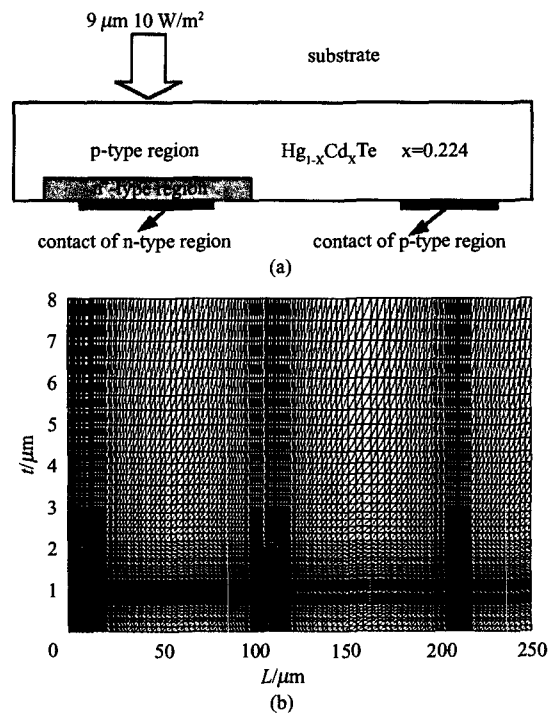


图 1 (a) n-on-p 结构  $HgCdTe$  红外探测器 (b) 器件的有限元网格分割

Fig. 1 (a) Structure of n-on-p  $HgCdTe$  photodiode (b) Finite element mesh for  $HgCdTe$  photodiode

表 1 计算中主要涉及的  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $x=0.224$ ) 基本材料参数<sup>[5-10]</sup> ( $T=80K$ )

Table 1 The main parameters of  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $x=0.224$ ) for simulation<sup>[5-10]</sup> ( $T=80K$ )

parameter	value	parameter	value
band gap $E_g$	0.122 eV	electron mobility $\mu_e$	$5.0 \times 10^6 cm^2/(V.s)$
absorption coefficient $\alpha$	$2.15 \times 10^3 cm^{-1}$	hole mobility $\mu_h$	$400 cm^2/(V.s)$
effective electron mass $m_e$	$9.15 \times 10^{-3} m_0$	Auger recombination rate $C_{AI}$	$3.54 \times 10^{-25} cm^6/s$
effective hole mass $m_h$	0.50 $m_0$	radiative recombination rate $C_R$	$2.00 \times 10^{-10} cm^3/s$
refractive index $n$	3.54		

复合),因此代表了材料最好性能时的探测器特性. n-on-p 结构中  $n^+$  区厚度一般为  $1\mu m$  左右,而且高掺杂区,电阻很小;相比之下 p 区较厚,在背照射条件下是光吸收的主要区域,同时电阻较大. p 区厚度的选择应该同时考虑光吸收和  $R_0A$  积两方面因素. 厚度增加,吸收增大,但由于是背照射,光生载流子与结区之间的距离增加,从而扩散到结区形成光电流的几率下降,厚度不能过大;增加 p 区厚度相当于减小并联电阻,厚度增加,  $R_0A$  积下降. 经计算, p 区厚度在  $7 \sim 20\mu m$  范围内,光电流变化不大. 因此器件 p 区厚度大约在  $10\mu m$  左右较为合适. 需要指出的是,如果采用一维模型,电极只能分别设置在  $HgCdTe$  外延层两边,串联体电阻使  $R_0A$  积随 p 区厚

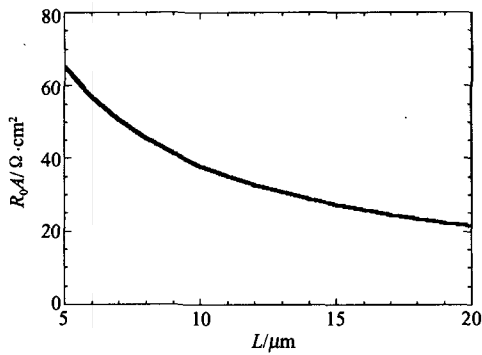


图 2  $R_0A$  积与 p 区厚度的关系  
Fig. 2  $R_0A$  product versus thickness of p-type region

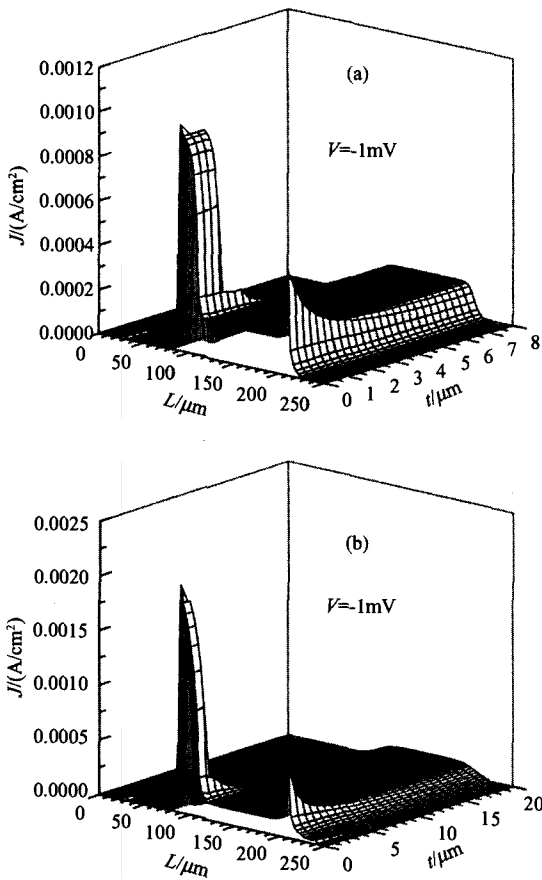


图 3 器件中的电流密度分布 (a) 厚度  $8 \mu\text{m}$  (b) 厚度  $20 \mu\text{m}$   
Fig. 3 Current density distribution in photodiode (a)  $8 \mu\text{m}$  thick layer (b)  $20 \mu\text{m}$  thick layer

度接近线性增加关系,与上述二维模型截然不同,与实际器件不符.实际上,图 1 所示的器件同时存在纵向、横向电流,电流密度分布不均匀(图 3(a)和图 3(b)分别给出器件厚度  $8 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$  时的电流密度分布),简单的一维模型难以处理,只能采用二维或三维模型.在以下模拟计算中,p 区厚度取  $10 \mu\text{m}$ ,与典型的器件结构相似.

### 2.2 p 区电极位置

$n^+$  区为高掺杂区, $n^+$  区电极大小对器件性能没有影响.p 区电阻较大,计算显示,不同 p 区电极宽度,器件性能相同.尽管电极大小对性能没有影响,但 p 区电极位置,即 p 区电极与  $n^+$  区之间的距离长短对  $R_0A$  积和光电流都有影响,如图 4 和图 5 所示.

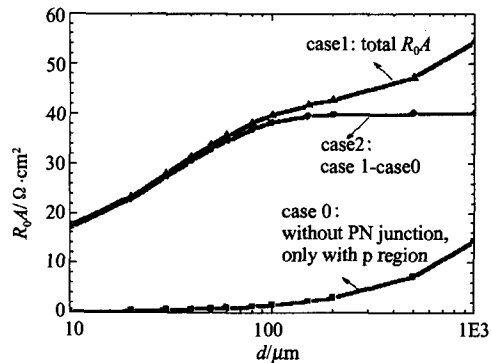


图 4  $R_0A$  积与 p 区电极位置的关系  
Fig. 4 Influence of p-type region contact position on  $R_0A$  product

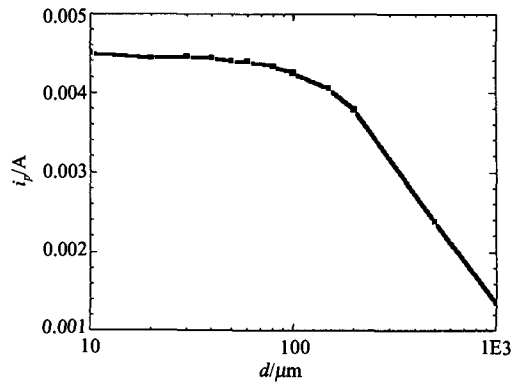


图 5 零偏光电流  $i_p$  与 p 区电极位置的关系  
Fig. 5 Zero-bias photocurrent  $i_p$  versus p-type region contact position

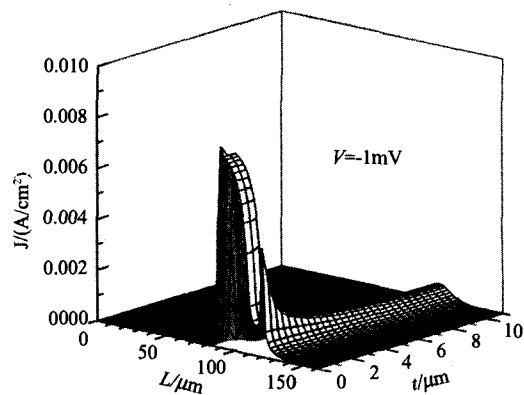


图 6 p 区电极距离  $10 \mu\text{m}$  时器件中电流密度分布  
Fig. 6 Current density distribution in photodiode at p-type region contact distance of  $10 \mu\text{m}$

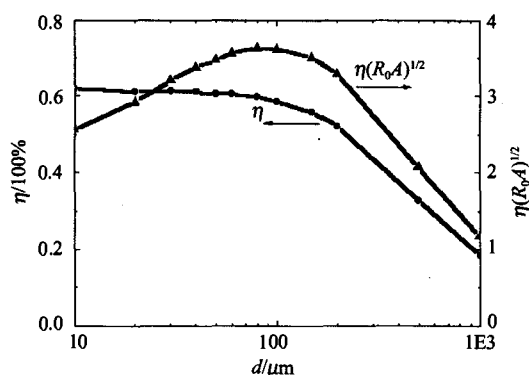


图7 量子效率  $\eta$ 、 $\eta(R_0A)^{1/2}$  与电极位置的关系  
Fig.7 Quantum efficiency  $\eta$  and  $\eta(R_0A)^{1/2}$  versus p-type region contact position

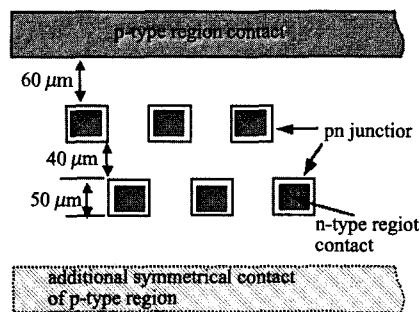


图8 HgCdTe 线列探测器平面几何结构  
Fig.8 Plan view layout of HgCdTe detector linear array

如果包括所有的电阻在内,  $R_0A$  积随电极之间距离增加明显增大 (case 1), 这其中含有 p 区串联电阻的影响. 如果把整个器件结构设置为均匀的 p 型, 按照同样的方法计算出该串联体电阻的大小 (case 0, 为了方便在同一情况下比较, 图 4 中给出的是电阻与结面积的乘积), 该电阻与电极之间距离基本成线性关系 (图中是半对数坐标). 二者相减 (case2 = case1 - case0) 可近似看作是不包括串联体电阻的 pn 结  $R_0A$  积. 电极之间距离在  $100\mu\text{m}$  以内,  $R_0A$  积随距离增加而增大; 超过  $100\mu\text{m}$ , 逐渐趋于稳定值. 出现这种情况的原因在于, 器件内的电场分布、电流密度分布与 p 区电极位置有关, 电极位置不同, 电场分布、横向纵向电流密度都相应变化, 使  $R_0A$  积随之变化. 图 6 给出电极间距离  $10\mu\text{m}$  时的电流密度分布, 与图 3 (电极间距离  $100\mu\text{m}$ ) 相比较, 有一定差别. 随着电极之间距离增加, 对 (结区) 电场分布、电流密度分布的影响逐渐减弱, pn 结  $R_0A$  积趋于稳定值.

与  $R_0A$  积相反, 零偏光电流随电极之间距离的

增加而下降, 如图 5 所示. 距离在  $100\mu\text{m}$  以内, 光电流变化不大; 距离大于  $100\mu\text{m}$ , 光电流显著下降. 光电流反映了量子效率, 光电流减小表明量子效率下降. 除电场分布、电流密度分布随电极位置变化外, 电极之间距离增加使光生载流子到达电极的收集效率下降是量子效率降低的主要原因. 假定增益为 1, 根据光电流可计算出量子效率 (如图 7), 与光电流变化趋势类似. 器件的探测率  $D^*$  与  $\eta$ 、 $R_0A$  积之间有如下关系<sup>[11]</sup>:

$$D^* \propto \eta(R_0A)^{1/2} \quad (1)$$

图 7 同时给出了  $\eta(R_0A)^{1/2}$  与电极位置的关系. 在距离 n<sup>+</sup> 区  $100\mu\text{m}$  左右,  $\eta(R_0A)^{1/2}$  达到最大值, 比  $10\mu\text{m}$  距离时的  $D^*$  可提高约 40%, 是 p 区电极的最佳位置.

一种实际的 HgCdTe 线列器件如图 8 所示. 两行 pn 结错开排列, 第一行 pn 结距离公共电极约  $60\mu\text{m}$ , 第二排 pn 结为  $150\mu\text{m}$ , 差别较大. 根据上面的讨论, 既是在其它条件完全相同的情况下, 电极之间距离不同也会引起两行探测单元动态电阻和光电流有差异, 使成像信号出现整体性的差别. 简单可行的方法是增设对称 p 区电极, 这样两行 pn 结完全对称, 可以消除由器件几何结构引起的信号差异, 同时不会增加工艺难度. 另外, 如果两电极之间距离较大, 如  $200\mu\text{m}$  以上, 光电流与光强明显偏离线性关系, 因此应该避免电极之间距离过大.

### 2.3 结区杂质浓度分布

在上面的计算中, 假定 n<sup>+</sup> 区与 p 区形成理想的突变 pn 结. 实际上根据形成 pn 结的具体条件不同, 施主杂质可以按照不同的浓度分布形式变化. HgCdTe 材料常用离子注入方法形成 pn 结, 在离子注入区 p 型外延层转变为 n 型. 随注入离子能量的不同, 施主杂质深入 p 区的分布形式、损伤的大小都不一样. 由于离子注入损伤与离子能量、剂量之间的关系, 以及损伤对材料电性能如迁移率、寿命的影响等, 目前还没有明确的函数关系, 本文不考虑材料损伤效应. 我们只考查较为简单的情况: 除施主杂质深入 p 区的分布形式不同外, 其它情况不变时的 pn 结性能.

用离子注入方式形成的 pn 结, 结区杂质浓度近似以高斯函数的形式分布<sup>[12]</sup>. 由于结区杂质分布最重要, 这里假定, 施主杂质以高斯函数 (方差为  $\delta$ ) 的分布形式深入 p 区, 形成缓变 pn 结, 如图 9 所示.

图 10 给出了  $R_0A$  积、零偏光电流与结区施主杂质浓度分布形状之间的关系.  $R_0A$  积随施主杂质分

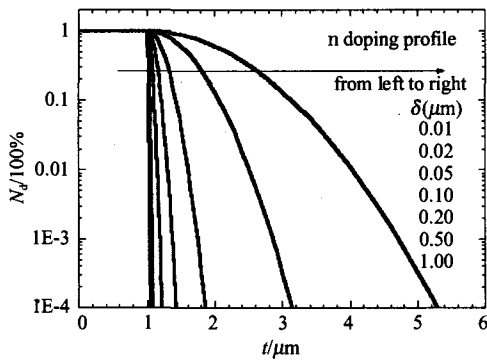


图9 结区施主杂质浓度分布  
Fig. 9 Different n-side doping profiles in junction region

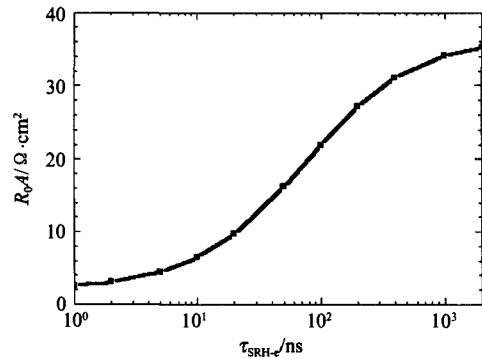


图11  $R_0A$  积与 SRH 复合电子寿命的关系  
Fig. 11  $R_0A$  product versus SRH lifetime of electron

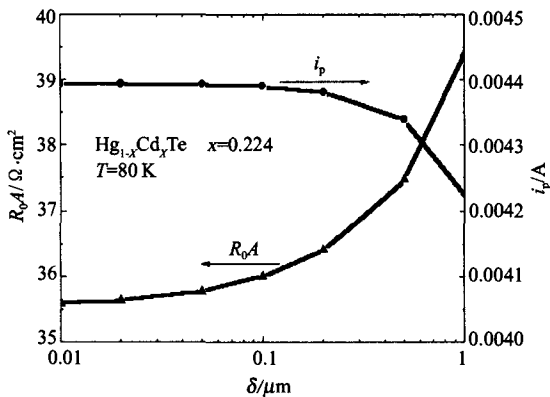


图10  $R_0A$  积、零偏光电流  $i_p$  与结区施主杂质浓度分布形状  $\delta$  的关系  
Fig. 10 Influence of n-side doping profile on  $R_0A$  product and zero-bias photocurrent  $i_p$

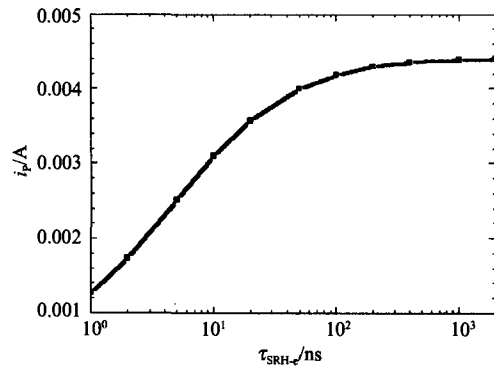


图12 零偏光电流  $i_p$  与 SRH 复合电子寿命的关系  
Fig. 12 Zero-bias photocurrent  $i_p$  versus SRH lifetime of electron

布展宽稍有上升,但变化不大;与此相反,光电流稍有下降.可见,尽管施主杂质分布形状变化很大,但对  $R_0A$  积和光电流影响不大.这表明突变结与缓变结的差异有限,突变结得出的结果基本上可以应用于缓变结.

2.4 少子寿命

对于 n-on-p 结构,光吸收主要发生在 p 区,p 区少数载流子(电子)寿命的长短对器件非常重要;相比之下,多子(空穴)寿命对器件影响较小. HgCdTe 材料电子寿命由三种复合过程决定:辐射复合、俄歇复合和 SRH 复合,前两种复合过程属于材料的固有性质,与工艺过程无关;而 SRH 复合与工艺优劣密切相关.材料中的缺陷、位错、杂质等能级有可能形成复合中心,增大 SRH 复合,降低电子寿命.

图 11 和图 12 分别给出了  $R_0A$  积、零偏光电流与 SRH 复合电子寿命的关系.从图中可以看出,随着 SRH 复合电子寿命变短,器件性能迅速下降.短

的电子寿命表明材料中缺陷、位错、杂质等形成的复合中心密度大,复合率高,因而使  $R_0A$  积和光电流降低.长的寿命使光生载流子有足够的时间漂移至结区电场,进而被收集形成光电流.为了使器件有较好的性能,SRH 复合电子寿命至少应该在  $10^2$  ns 以上;在  $1\mu\text{s}$  左右时, $R_0A$  积和光电流趋于饱和.高质量的 HgCdTe 材料,复合中心密度小,SRH 复合电子寿命长.少子寿命是探测器性能的重要标志.

3 结论

运用专用的半导体器件设计软件,模拟计算了光伏型长波 HgCdTe 探测器的  $R_0A$  积、零偏光电流与器件参数之间的关系.计算采用二维模型和 n-on-p 结构,对所涉及的 HgCdTe 材料参数根据相关文献作了改动和修正.模拟计算特别注意了载流子横向扩散形成的横向电流对器件性能的影响.

计算表明,器件  $R_0A$  积随 p 型外延层厚度增大而减小,光电流变化不大,对于组分  $x=0.224$  长波探测器,p 型外延层厚度大约在  $10\mu\text{m}$  左右较为合

适. 横向电流的存在使得器件性能与 p 区电极位置有关,  $R_0A$  积随电极之间距离增大而增加, 但量子效率(光电流)下降, 权衡对探测率  $D^*$  的影响, p 区电极距离  $n^+$  区大约  $100\mu\text{m}$  最佳.  $R_0A$  积和光电流对结区施主杂质分布形式不敏感, 缓变结与突变结差别不大. 对于 n-on-p 结构来说, 器件性能依赖于电子寿命, 电子 SRH 复合寿命至少应在  $10^2\text{ns}$  以上, 即材料中只能有低的复合中心密度.

### REFERENCES

- [1] Singh S K, Gopal V, Bhan R K, *et al.* Analysis of the dynamic resistance variation as a function of reverse bias voltage in a HgCdTe diode [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2000, **15**:752—755.
- [2] Gopal V, Singh S K, Mehra R M. Analysis of dark current contributions in mercury cadmium telluride junction diodes [J]. *Infrared physics and technology*, 2002, **43**:317—326.
- [3] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, ZHANG Hai-Yan, *et al.* Study of dark current for mercury cadmium HgCdTe long wavelength photodiode detector with different structures [J]. *J. Infrared Millim Waves* (叶振华, 胡晓宁, 张海燕, 等. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(2): 86—90.
- [4] SUN Tao, LIANG Jin-Sui, CHEN Xing-Guo, *et al.* Low-frequency noise of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  long-wave photovoltaic detector [J]. *J. Infrared Millim Waves* (孙涛, 梁晋穗, 陈兴国, 等.  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  长波光伏探测器的低频噪声研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(4): 273—276.
- [5] Seiler D G, Lowney J R, Littler C L, *et al.* Temperature and composition dependence of the energy gap  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  by two phonon magnetoabsorption techniques [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1990, **8**:1237—1244.
- [6] Rogalski Antoni, Adamiec Krzysztof, Rutkowski Jaroslaw. *Narrow-gap Semiconductor Photodiodes* [M]. USA: SPIE Press, 2000, 15—82.
- [7] 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.
- [8] Liu Kun, Chu J H, Tang D Y. Composition and temperature dependence of the refractive index in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(8):4176—4179.
- [9] Zucca R, Edwall D D, Chen J S, *et al.* Minority carrier lifetime of metalorganic chemical vapor deposition long-wavelength infrared HgCdTe on GaAs [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1991, **9**(3):1823—1828.
- [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 A. *Infrared Detectors* [M]. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2000, 200—202.
- [12] Talipov N Kh, Ovsyuk V N, Remesnik V G, *et al.* Electrical activation of boron implanted in p-HgCdTe ( $x = 0.22$ ) by low-temperature annealing under an anodic oxide [J]. *Material Science and Engineer B*, 1997, **44**:266—269.