

HgCdTe 薄膜材料组分分布对器件响应光谱的影响

崔宝双, 魏彦锋, 孙权志, 杨建荣

(中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要:研究了 HgCdTe 液相外延薄膜的纵向组分分布对探测器响应光谱的影响. 提出了一种计算 HgCdTe 红外探测器响应光谱的模型, 模型中综合考虑了薄膜的实际组分分布以及光在器件各层结构中的相干、非相干传输. 计算结果表明, 在探测器的光吸收区, HgCdTe 液相外延薄膜的组分梯度及其产生的内建电场可以显著地提高器件的响应率. 通过与实验数据进行比较, 验证了模型的适用性.

关键词: HgCdTe 红外探测器; 纵向组分分布; 响应光谱; 光传输模型

中图分类号: TN214 **文献标识码:** A

Effect of composition distribution in the HgCdTe film on spectral response of device

CUI Bao-Shuang, WEI Yan-Feng, SUN Quan-Zhi, YANG Jian-Rong

(Key laboratory of infrared image materials and devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The effect of LPE HgCdTe longitudinal composition distribution on device's spectral response was studied. A new model was proposed to calculate the spectral response of HgCdTe IR detector. This model considered the real composition distribution in HgCdTe film. The coherent and incoherent light transmission among the device were also included. The calculated result indicates that the composition gradient of LPE HgCdTe film and the built-in electric field can evidently improve the response of the device. The calculated result agreed with the measured data, and proved the accuracy of the model.

Key words: HgCdTe IR detector; longitudinal composition distribution; spectral response; model of light transmission

PACS: 78.30.Fs, 78.20.Bh, 78.66.Hf

引言

HgCdTe 的禁带宽度和红外波段的光子能量相匹配, 是一种重要的红外探测器材料, 在工业生产、环境监测和国防等领域有着重要的应用. 液相外延 (LPE) 是目前较为成熟的 HgCdTe 薄膜生长技术之一, 但是液相外延方法生长 HgCdTe 薄膜存在纵向组分不均匀的现象^[1], 这种不均匀性会对材料以及器件的光电特性产生影响, 对于器件来说, 由于组分梯度的存在, 会改变器件光吸收区的有效宽度, 也会影响器件的光响应特性. 因此, 对于由液相外延薄膜制备的器件, 在研究其响应光谱时, 需要考虑到纵向

组分分布的影响. 已经有学者对吸收区为线性组分分布的 HgCdTe 探测器的响应光谱进行了研究, 讨论了组分梯度、内建电场、表面复合速率等参数对响应光谱的影响^[2-3], 以及光在界面的反射对响应光谱的影响^[4]. 但是, HgCdTe 液相外延薄膜实际的组分分布并不是线性的^[1]. 并且, 器件的光吸收区、减反层、钝化层的厚度小于入射光的相干长度, 光在其中的传输是相干的, 衬底的厚度通常大于入射光的相干长度, 光在其中的传输是非相干的, 考虑光在器件中的传输时要采用相干和非相干模型^[5]. 本文提出了一种计算 HgCdTe 光伏红外探测器响应光谱的模型, 与以前研究的不同之处在于, 该模型综合考虑了

收稿日期: 2012-02-23, 修回日期: 2012-04-19

基金项目: 国家自然科学基金 (60876012)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (60876012)

作者简介 (Biography): 崔宝双 (1987-), 女, 黑龙江佳木斯人, 硕士研究生, 主要研究领域为 HgCdTe 红外材料与器件特性. E-mail: cbsshuang@gmail.com.

Received date: 2012-02-23, **revised date:** 2012-04-19

HgCdTe 液相外延薄膜的非线性组分分布,并且考虑了光在衬底中的非相干传输和光在各层薄膜中的相干传输.利用该模型可以分析 HgCdTe 薄膜材料组分分布对器件响应光谱的影响.

1 理论模型与计算

1.1 HgCdTe 液相外延薄膜的组分分布

由于衬底与外延层之间的互扩散、各组分的分凝及生长溶液中 Hg 的挥发等因素的影响,用液相外延方法生长的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 薄膜存在纵向组分不均匀的现象.液相外延 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 薄膜在生长方向(z 方向)上的组分分布 x 可以表示为^[1]:

$$x(z) = X_s + S(d - z) + (1 - X_s - Sd) \left(1 - \left(\text{erf}\left(\frac{2z}{\Delta z}\right)\right)^3\right) \quad (1)$$

其中, z 是距离衬底的距离, X_s 与薄膜表面组分有关, d 是外延层总厚度, S 是组分梯度, Δz 为互扩散区宽度,是误差函数.互扩散区的存在是由于衬底和外延层之间的组分互扩散引起的,其宽度通常为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$.

图 1 是根据公式(1)计算的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延薄膜的纵向组分分布.从图中可以看到,其组分分布与文献[2-4]中采用的线性分布有很大区别,只有在离开互扩散区时,组分 x 与距离 z 才近似呈线性关系.

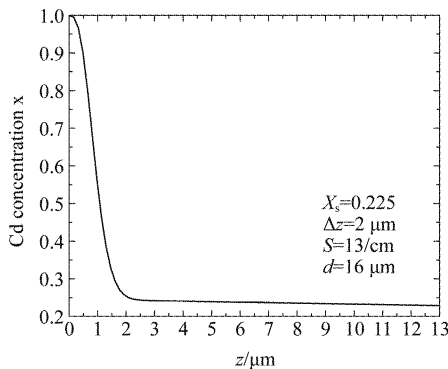


图 1 HgCdTe 液相外延薄膜的纵向组分分布
Fig. 1 Longitudinal distribution of Cd concentration in LPE HgCdTe film

HgCdTe 的禁带宽度与 Cd 组分有关,因此 HgCdTe 液相外延薄膜在 z 方向上的组分分布会引起禁带宽度在 z 方向上的变化,进而会产生内建电场 E ^[4]:

$$E = \frac{1}{q} \frac{dE_g}{dz} \quad (2)$$

其中, E_g 是禁带宽度, E_g 与组分、温度的关系采用 Hansen-Schmit 提出的经验公式^[6]; q 是单位电荷.内建电场会影响器件中少数载流子的漂移运动.

LPE 碲镉汞薄膜互扩散区的 Cd 组分变化很大,所以其内建电场很大,对少数载流子的影响也很大,进而会对光电流及响应产生影响.所以对于 LPE 碲镉汞薄膜,需要考虑互扩散区的非线性组分,才能更加准确的理解和描述器件的响应光谱.以前的研究中没有考虑到互扩散区的非线性组分,本文在下面的光生少子产生速率的计算和响应光谱的计算中都考虑了 LPE 碲镉汞薄膜互扩散区的非线性组分分布.

1.2 光生少子产生速率的计算

考虑背照射式的 n-on-p 型光伏探测器,图 2 是器件的结构示意图.

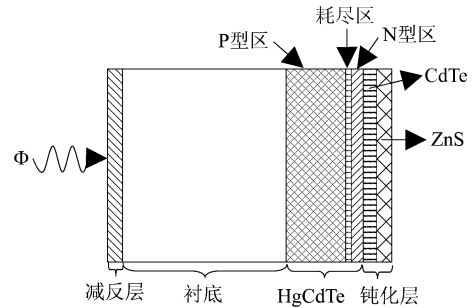


图 2 背照射式探测器的结构

Fig. 2 Structure of the Back-illuminated detector

减反层、HgCdTe 层以及钝化层的厚度小于光的相干长度,计算光在其中的传输要使用相干模型;衬底的厚度通常在 $100 \mu\text{m}$ 以上,大于光的相干长度,计算光在其中的传输要使用非相干模型.

首先考虑相干传输模型.减反层是单层膜、钝化层是双层膜,HgCdTe 薄膜可以看做是组分不同的单层膜构成的多层膜系.电磁波在多层膜中的相干传输可以用层矩阵来描述^[7]:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}$$

层矩阵 S 由 2 种矩阵组成,处理层间的反射、透射系数的界面传输矩阵 H 和处理光的相移的层传输矩阵 L :

$$H_{ij} = \frac{1}{\rho_{ij}} \begin{pmatrix} 1 & \rho_{ij} \\ \rho_{ij} & 1 \end{pmatrix}, L_j = \begin{pmatrix} e^{i\beta_j} & 0 \\ 0 & e^{i\beta_j} \end{pmatrix},$$

上式中, i, j 是相邻两层的编号,在垂直入射条件下:

$$\rho_{ij} = \frac{(n_i - n_j)}{(n_i + n_j)}, \tau_{ij} = \frac{2n_i}{(n_i + n_j)}, \beta_j = \frac{2\pi n_j d_j}{\lambda},$$

其中, d_j 是第 j 层的厚度, n_i 是第 i 层的复折射率, n_j 是第 j 层的复折射率, λ 是波长.

N 层膜的层矩阵为:

$$S = \left(\prod_{i=1}^N H_{i,j+1} L_{i+1} \right) \quad (3)$$

多层膜入射光电场、反射光电场和出射光电场的关系可以用多层膜的层矩阵联系起来:

$$\begin{pmatrix} E_{refl} \\ E_{inc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E_{trans} \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中 E_{inc} , E_{refl} 和 E_{trans} 分别是入射光的电场强度、反射光的电场强度和出射光的电场强度.

多层膜整体的反射率 R , 透射率 T 分别为:

$$R = |r|^2 = \left| \frac{E_{refl}}{E_{inc}} \right|^2 = \left| \frac{S_{12}}{S_{22}} \right|^2,$$

$$T = \frac{n_s}{n_0} |t|^2 = \frac{n_s}{n_0} \left| \frac{E_{trans}}{E_{inc}} \right|^2 = \frac{n_s}{n_0} \left| \frac{1}{S_{22}} \right|^2 \quad (5)$$

其中 r, t 分别是多层膜的反射系数和透射系数, n_0 和 n_s 分别是入射和出射介质的折射率.

由多层膜的层矩阵可以求出各层薄膜中的电场, 各层中电磁波能量的时间平均值为: $\bar{S} = \frac{1}{2} \varepsilon c |E \times H|$, 其中 ε 为介电常数, c 为光速.

在本文所考虑的 $1 \sim 15 \mu\text{m}$ 的波段, 器件的减反层、衬底、钝化层材料的禁带宽度大于最大光子能量, 对光没有吸收^[8], 若材料存在缺陷会对光有吸收, 但一般与波长无关, 如文献[9]中的 CdZnTe 衬底的红外透射谱. 一般考虑器件的归一化响应光谱, 可以不考虑以上各层对光的吸收. 只需要计算光在 HgCdTe 层中的吸收. 假设一个光子产生一个电子空穴对, HgCdTe 薄膜中损失的电磁波能量即为薄膜吸收的光的能量, 薄膜吸收的光的能量除以单个光子能量即为吸收光子的数目, 少子产生的数目等于吸收光子的数目, 所以, 少子的产生率为: $G = \frac{1}{E_{photon}} \frac{d\bar{S}}{dz}$, 其中 E_{photon} 是单光子的能量.

在上面计算中需要用到材料的光学常数, 减反层、衬底、钝化层的光学常数取自文献[8], HgCdTe 的折射率取自文献[10], HgCdTe 的吸收系数取自文献[11].

在计算光生少子产生率时, 需要计算入射光从减反层表面传输到 HgCdTe 表面时的能量变化, 虽然减反层和衬底对光没有吸收, 但是会有界面的反

射, 因此入射光从减反层表面传输到 HgCdTe 表面时能量会有损失. 前面提到, 由于衬底的厚度通常大于光的相干长度, 因此光通过衬底时需要采用非相干传输模型. 图 3 是光在相干膜和非相干膜构成的多层结构中传输的示意图. 为了求出光传输到 HgCdTe 表面的强度, 需要计算图 3 中的透射率 T . 对于光的非相干传输, 只需要考虑光强的叠加:

$$T = T_1 + T_1 R_2 R_1 + T_1 R_2 R_1 R_2 R_1 + \dots$$

$$T_1 R_2 R_1 R_2 R_1 R_2 R_1 + L = \frac{T_1}{1 - R_1 R_2} \quad (6)$$

其中 T_1, R_1, R_2 的意义如图 3 所示. 计算 T_1 和 R_1 时, 将空气和衬底看作半无限介质, 使用公式(3)、(4)、(5)计算. 同理可以计算 R_2 .

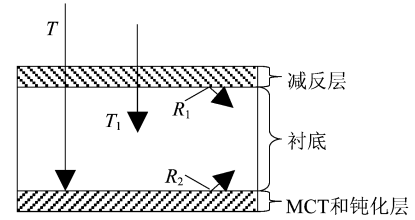


图 3 光传输的非相干模型

Fig. 3 Incoherent model of the light transmission

1.3 响应光谱的计算

响应光谱是探测器的光电流响应与入射波长的关系. 响应率表征器件的转化效率, 定义为光电流与入射光功率之比. 计算响应光谱要先计算入射光激发的过剩少子浓度, 由过剩少子浓度得到光电流密度, 然后得到器件的响应.

考虑图 2 中 P 区、N 区和耗尽区构成的一维 PN 结模型, 在稳态、小信号的情况下^[12,13], P 区的过剩少子(电子)浓度满足连续性方程:

$$\frac{1}{q} \nabla J_n - \frac{\Delta n(z)}{\tau_n} + G(z) = 0 \quad (7)$$

边界条件为 $J_n|_{z=0} = qS_n \Delta n(0)$, 和 $\Delta n(z)|_{z=d} = 0$

同理, n 区的过剩少子(空穴)浓度满足连续性方程:

$$-\frac{1}{q} \nabla J_p - \frac{\Delta p(z)}{\tau_p} + G(z) = 0 \quad (8)$$

边界条件为 $\Delta p(z)|_{z=d+w} = 0$ 和 $J_p|_{z=d+w+d1} = -qS_p \Delta p(d+w+d1)$.

上面的公式中, d 是 P 区的厚度, w 是空间电荷区的厚度, $d1$ 是 N 区的厚度, 坐标原点为图 2 中 P 区与衬底的界面处; $G(z)$ 是少子产生速率, E 是电

场强度; D_n, τ_n, μ_n 分别是 P 型材料的少子扩散系数、少子寿命和少子迁移率; D_p, τ_p, μ_p 分别是 N 型材料的少子扩散系数、少子寿命和少子迁移率; S_n 是 P 区与衬底界面处的少子复合速率, S_p 是 N 区与钝化层界面处的少子复合速率; 少子扩散系数和少子迁移率满足爱因斯坦关系, $D = \left(\frac{K_B T}{q}\right) \mu$. J_n 和 J_p 分别电子电流密度和空穴电流密度:

$$J_n = qD_n \frac{d\Delta n(z)}{dz} + q\mu_n \Delta n(z) E \quad (9)$$

$$J_p = -qD_p \frac{d\Delta p(z)}{dz} + q\mu_p \Delta p(z) E \quad (10)$$

由上述连续性方程和边界条件可以求解出过剩少子浓度. 再由过剩少子浓度得到电流密度:

电子电流密度和空穴电流密度由公式(9)、(10)计算,

$$\text{空间电荷区的电流密度: } J_{scr} = q \int_d^{d+W} G(z) dz \quad (11)$$

$$\text{总电流密度: } J = J_n|_{z=d} + J_p|_{z=d+W} + J_{scr} \quad (12)$$

最后由电流密度计算探测器的响应率: $R_i = \frac{\eta(\lambda)q\lambda}{hc}$, 其中量子效率 $\eta = \frac{I}{qA\Phi} = \frac{J}{q\Phi}$, h 是普朗克常数, c 是光速, Φ 为入射光通量, 响应率和波长的关系即为响应光谱.

上面公式中需要使用材料的电学参数, 其中材料的少子扩散长度和少子寿命可以用多种实验方法进行测量, 少子扩散系数可以由少子扩散长度和少子寿命求出: $D = L^2/\tau$, 少子迁移率可以由爱因斯坦关系求出.

由于此模型中考虑了 HgCdTe 材料的非线性组分分布, 连续性方程没有解析解, 需要使用数值方法, 将微分方程变为差分方程进行求解.

至此建立了计算 HgCdTe 光伏红外探测器响应光谱的模型, 该模型综合考虑了 HgCdTe 液相外延薄膜的非线性组分分布, 并且考虑了光在衬底中的非相干传输和光在各层薄膜中的相干传输. 下面利用该模型分析 HgCdTe 薄膜材料组分分布对器件响应光谱的影响.

2 结果与讨论

2.1 组分分布对响应光谱的影响

量子效率和响应光谱反应的是器件的同一特性. 为了便于比较, 下面的讨论使用的是器件的量子效率.

使用本文中的计算模型, 计算图 2 结构的器件的量子效率, 讨论组分分布对量子效率的影响, 如图

4、图 5 和图 6 所示. 计算时, HgCdTe 的厚度设为 16 μm , 少子扩散长度设为 20 μm , 器件没有使用减反层. 图 4 中, 计算曲线 A、B、C 时, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的 Cd 组分分别采用了均匀分布、线性分布和非线性分布. 计算时, 调整组分参数, 使得三条曲线的截止波长相等, 以便于比较, 其中均匀分布组分为 $x = 0.231$, 线性分布组分为 x 的值为 0.2458 至 0.225, 非线性组分分布的参数如图(1). 计算时, 设 HgCdTe 和衬底的界面处的复合速率为 0. 可以看到, 曲线 B、C 比 A 的量子效率有明显的提高, 而曲线 C 比 B 的量子效率也略有提高.

为了找出图 4 中曲线 B、C 比 A 量子效率提高的原因, 我们计算了组分梯度所引入的内建电场对量子效率的影响, 如图 5 所示. 在图 5 中, 计算曲线 C、D 时使用的参数与图 4 中曲线 C 的参数相同, C 和 D 的区别是, 在计算曲线 D 时, 没有考虑公式(9)、(10)中的内建电场 E , 也即不考虑内建电场引起的载流子的漂移运动, 可以看到, 曲线 D 比 C 的量子效率明显降低. 量子效率的变化主要是由内建电场引起的, 内建电场有利于少子向结区做漂移运动, 提高器件的光电流响应和量子效率.

计算图 4 时, 设 HgCdTe 和衬底的界面处的复合速率为 0. 但是实际的界面会有一些的复合速率, 因此图 6 计算时设 HgCdTe 和衬底的界面处的复合速率为 1 000 m/s , 其他参数及曲线 A、B、C 的含义与图 4 相同, 来讨论界面复合速率的影响. 图 6 中的曲线 A、B 比图 4 中的曲线 A、B 的量子效率有明显的下降, 而图 6 中的曲线 C 与图 4 中的曲线 C 的量子效率相比几乎不变. 这表明, 对吸收区为线性组分和均一组分 HgCdTe 的器件, 界面复合速率对量子效率影响很大, 会降低其量子效率; 但是对如图 1 所示的非线性组分, 界面复合速率对量子效率几乎没有影响. 这是由于吸收区 HgCdTe 的组分为线性组分和均一组分时, 在界面附近内建电场很弱或者没有, 少子浓度较高, 所以界面的复合速率对光电流影响较大, 即对量子效率影响较大. 对于 HgCdTe 为非线性组分时, 界面附近的互扩散区的组分变化大, 所以内建电场强, 强的内建电场可以使少子向结区漂移, 在界面附近少子浓度很低, 所以界面的复合速率对光电流影响很小, 即对量子效率影响很小.

由上面的讨论可知, HgCdTe 薄膜不同的组分分布对量子效率的影响很大. 液相外延 HgCdTe 薄膜的实际组分分布及其产生的内建电场可以显著地提高器件的量子效率. 而在模拟器件的量子效率时, 若

使用线性组分来代替液相外延 HgCdTe 薄膜的实际组分分布进行计算分析, 结果的误差可能较大. 因此, 在分析量子效率的时候, 要考虑到材料的实际 Cd 组分分布. 在器件设计过程中, 需要将材料的 Cd 组分分布作为一项关键参数来进行优化设计.

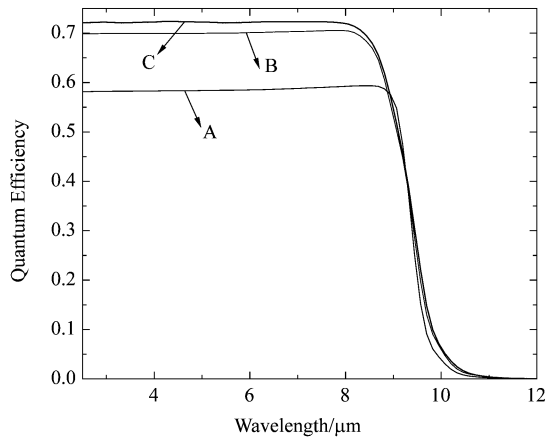


图 4 HgCdTe 薄膜分别为均一组分、线性组分和非线性组分时计算得到的量子效率 A、B 和 C, $S_n = 0$

Fig. 4 A, B and C are the calculated quantum efficiency for constant, linear and nonlinear Cd concentration distribution in HgCdTe film respectively, S_n is 0

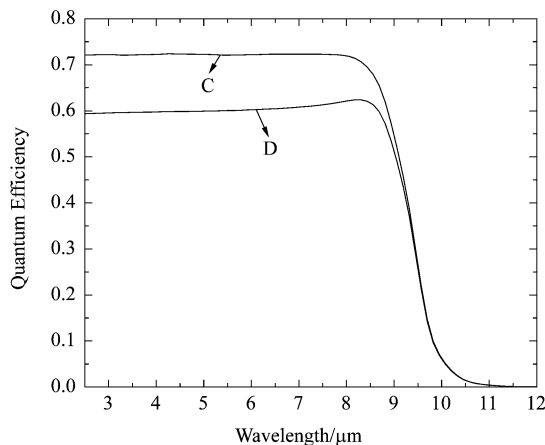


图 5 HgCdTe 薄膜中的内建电场对量子效率的影响, 曲线 C 考虑内建电场, 曲线 D 不考虑内建电场, $S_n = 0$

Fig. 5 The effect of built-in electric field in HgCdTe film on the quantum efficiency, C considers the built-in electric field and D does not consider it. S_n is 0

2.2 实验数据和模拟结果

采用本文中的计算模型, 与实验数据进行了比较. 红外探测器的结构如图 2, 未使用减反层, 衬底是厚度为 $350 \mu\text{m}$ 的 CdZnTe, HgCdTe 是使用液相外延方法生长的, 厚度为 $8 \mu\text{m}$, 平均 Cd 组分 X 为 0.2767.

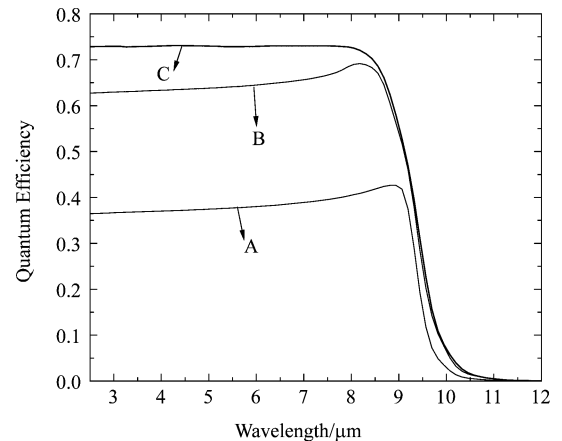


图 6 HgCdTe 薄膜分别为均一组分、线性组分和非线性组分时计算得到的量子效率 A、B 和 C, $S_n = 1000 \text{ m/s}$

Fig. 6 A, B and C are the calculated quantum efficiency for constant, linear and nonlinear Cd concentration distribution in HgCdTe film, respectively, S_n is 1000 m/s

图 7 是实验数据和计算的结果. 两条曲线在截止波长附近符合较好, 但是在短波方向偏差较大. 并且, 实验曲线中有一些细微的结构在计算曲线中没有出现. 分析出现偏差的原因, 可能有以下几种: (1) 测试是在大气环境中进行, 空气中的水汽以及 CO_2 会对测试结果有影响. (2) 实际的探测器是三维的, 本模型中只考虑了一维结构, 对实际结构的简化会影响计算结果. (3) 所选取的材料物理参数的准确性也会对结果有影响. 近期有研究结果表明, Hg 空位、掺杂等浅能级之间的吸收、复合过程可能强于带带之间的过程^[14,15]. 因此对于指数吸收边、禁带宽度等表达式可能需要进行修正, 在吸收边附近理论和实验曲线的差别可能源于此. 尽管有以上的诸多不确定性, 本文中的模型可以计算器件的截止波长以及响应率曲线的变化趋势, 还可以通过改变诸多的参数来寻求优化的探测器结构设计.

表 1 是计算图 7 时使用的参数. 其中 X_s 、 S 、 Δz 的含义与公式(1)相同, 互扩散区厚度 Δz 采用的是经验数据 $2 \mu\text{m}$. 当取互扩散区厚度为 $1 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 时, 理论计算的峰值响应率的相对差别为 2.3%, 可以看到, 响应率的变化很小, 计算中互扩散区厚度设为 $2 \mu\text{m}$ 时所引入的误差很小, 可以不考虑. P 区的组分分布采用非线性分布. P 区的少数扩散长度和少数寿命取自实验测量值. 因为器件的 N 区厚度很小, 实验上测量其少数扩散长度和少数寿命存在困难, 使用的是文献[16]中的报道的数据. 同时又因为 N 区的厚度很小, 所产生的光生少数远少于 P 区的光生少数, 所以由 N 区少数扩散长度和少数寿命

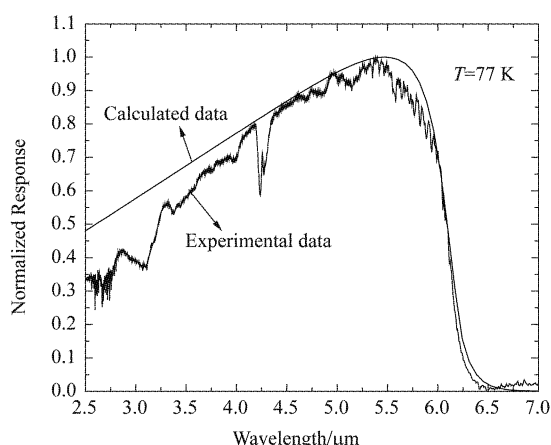


图7 实验数据和拟合结果的对比

Fig. 7 Comparison of experimental spectral response with the one calculated

的误差对响应光谱引进的误差也很小,可以忽略.

表1 计算图6时使用的参数

Table 1 The parameters used in calculating Fig. 6

	厚度(μm)	少子扩散长度(μm)	少子寿命(s)	Cd的组分分布
P区	8	20	0.02	$X_s=0.27, \Delta z=2 \mu\text{m}, S=13/\text{cm}$
N区	1	3	0.01	$X=0.27$
耗尽区	0.1	\	\	$X=0.27$

3 结论

研究了具有组分梯度吸收区的 HgCdTe 光伏探测器的响应光谱. 所使用的模型考虑了吸收区的非线性组分分布以及光在探测器各个结构之间的相干、非相干效应,用数值方法求解载流子的一维连续性方程,并由此计算出器件的响应光谱. 由计算结果可以得知:液相外延 HgCdTe 薄膜的组分梯度及其内建电场对器件的响应率影响很大. 在器件设计时需要考虑材料中 Cd 组分的实际分布及其产生的内建电场. 通过对实验结果进行模拟,证明本文提出的模型可以较好地描述探测器的光谱响应特性,可以对器件的结构和各部分的参数进行优化,以达到最佳的器件性能.

REFERENCES

[1] WANG Qing-Xue, WEI Yang-Feng, YANG Jian-Rong, *et al.*

Effect of LPE -HgCdTe Composition Ununiformity on Infrared Transmission Spectra[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*(王庆学,魏彦锋,杨建荣,等.液相外延 HgCdTe 薄膜组分均匀性对红外透射光谱的影响. *半导体学报*), 2005, **26**(5):904-908.

- [2] ROSENFELD D, GARBER V, BAHIR G. Quantum efficiency and spectral response of compositionally graded HgCdTe P-n heterojunction photodiodes[J]. *Appl. Phys.*, 1994, **76**(7):4399-4406.
- [3] ROSENFELD D, GARBER V, BAHIR G. Compositionally Graded HgCdTe Photodiodes: Prediction of Spectral Response From Transmission Spectrum and the Impact of Grading[J]. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 1995, **24**(9):1321-1328.
- [4] DONALD L L. Modeling of Optical Response in Graded Absorber Layer Detectors[J]. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 2006, **35**(6):1423-1428.
- [5] D' SOUZA A I, ROBINSON E, WIJEWARNASURIYA P S, *et al.* Spectral Response Model of Backside-Illuminated HgCdTe Detectors[J]. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 2011, **40**(8):1657-1662.
- [6] HANSEN G L, SCHMIT J L, CASSELMAN T N, *et al.* Energy gap versus alloy composition and temperature in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**(10):7099-7101.
- [7] KLEIN M V, FURTAK T E. *Optics* [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1986: 295-300.
- [8] PALIK E D. *Handook of Optical Constants of Solids* [M]. London: Academic Press, 1985:415-619.
- [9] ZHANG Xiao-Wen, ZHAO Zeng-Lin, ZHANG Peng-Ju, *et al.* Comparison of CdZnTe crystals grown by Bridgman method under Te-rich and Te-stoichiometric conditions respectively and the annealing effects[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, **311**(2):286-291.
- [10] FINKMAN E, SCHACHAM S E. The exponential optical absorption band tail of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1984, **56**: 2896-2900.
- [11] HOUGEN C A. Model for infrared absorption and transmission of liquidphase epitaxy HgCdTe [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**: 3763-3766.
- [12] DIETER K S. *Semiconductor Material and Device Characterization* [M]. 3rd ed. Canada: A Wiley-Interscience Publication, 2006: 441-444.
- [13] ZENG Shu-Rong. *Semiconductor Device Physics* [M]. Beijing: PeKing University Press(曾树荣. *半导体器件物理基础*. 北京:北京大学出版社), 2007:30-323.
- [14] SHAO Jun, LV Xiang, GUO Shao-Ling, *et al.* Impurity levels and bandedge electronic structure in as-grown arsenic-doped HgCdTe by infrared photoreflectance spectroscopy[J]. *PHYSICAL REVIEW B*, 2009, **80**(15):155125-11.
- [15] SHAO Jun, LV Xiang, LU Wei, *et al.* Cutoff wavelength of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epilayers by infrared photoreflectance Spectroscopy [J]. *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 2007, **90**(17):171101.
- [16] Peter C. *Properties of narrow gap cadmium based compounds* [M]. England: Short Run Press Ltd, 1994:227-241.