

具有组分梯度的 HgCdTe 探测器光电特性

徐国庆*, 王 仍, 陈心恬, 储开慧, 汤亦聃, 贾 嘉, 王妮丽, 杨晓阳,
张 燕, 李向阳

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: PN 结分别制备在 HgCdTe 外延薄膜材料的 Cd 组分非线性分布区和线性分布区的高组分端, 研究了具有组分梯度的 HgCdTe 探测器的光电特性。计算不同温度下组分梯度产生的内建电场, 结果显示 Cd 组分线性分布产生的内建电场在 100 ~ 200 V/cm, 而 Cd 组分非线性分布使得样品表面薄层的内建电场高达 2 000 V/cm, 推测组分梯度产生的内建电场对光生少子运动的影响是引起两个样品光电性能差异的主要原因。通过分析样品响应率随温度的三种不同变化趋势, 提出利用温度调控组分梯度产生的内建电场, 有利于降低空间电荷效应, 为大注入下提高 HgCdTe 探测器的饱和阈值提供了一种新的设计思路。

关键词: 组分梯度; 内建电场; HgCdTe 外延薄膜材料; 归一化响应光谱; 响应率
中图分类号: TN215 文献标识码: A

Photoelectric characteristics of compositionally graded HgCdTe detector

XU Guo-Qing*, WANG Reng, CHEN Xin-Tian, CHU Kai-Hui, TANG Yi-Dan, JIA Jia,
WANG Ni-Li, YANG Xiao-Yang, ZHANG Yan, LI Xiang-Yang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The junctions are prepared at the high composition end of nonlinear composition region and linear composition region respectively, and the photoelectric performance of HgCdTe detector with composition gradient was studied. By calculating the built-in electric field of composition gradient in two samples with different temperatures, the results show that the built-in electric field generated by the linear composition distribution is 100 ~ 200 V/cm, while the built-in electric field generated by the nonlinear composition distribution makes the electric field on surface of the sample as high as 2 000 V/cm. The analysis indicates that the influence of the built-in electric field generated by the composition gradient on the movement of the minority carrier is the main reason for the difference in the photoelectric properties of the two samples. By analyzing the three different trends of responsivity of the sample with different temperatures, it is proposed that using the built-in electric field generated by the composition gradient which is controlled by temperature can reduce the space charge effect and provides a new thought for improving the saturation threshold of the HgCdTe detector under large injection.

Key words: component gradient, built-in electric field, HgCdTe epitaxial material, normalized response spectrum, responsivity

引言

随着光电子技术的发展, HgCdTe 光电探测器在军事和国民经济的各个领域都有广泛的应用。光

电探测器一般工作在线性响应区, 其输出信号与入射光强成正比, 当入射光强超出光电探测器线性工作范围后, 器件出现饱和效应, 噪声限制了器件所能探测的最小光功率, 饱和限制了器件所能探测的

收稿日期: 2022-07-05, 修回日期: 2023-02-16
基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFA0715501)

Received date: 2022-07-05, revised date: 2023-02-16

Foundation item: Supported by the National key Research and Development Program of China (2021YFA0715501)

作者简介 (Biography): 徐国庆 (1979-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事红外碲镉汞探测器的研究

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xuguoqing@mail.sitp.ac.cn

最大光功率。研究者在致力于研究如何降低线性工作范围下限实现微弱信号探测的同时,也在研究如何提高线性工作范围上限。但由于空间电荷效应^[1-3]和热效应等因素,光电探测器很难直接探测大功率的入射光。

大功率入射光辐照光电探测器,当入射光产生的非平衡少数载流子浓度接近或者超过原来的平衡状态下的多数载流子浓度时,耗尽区内的光生载流子浓度非常高,由于空穴的迁移率比电子的迁移率低,残留在耗尽层中的大量空穴产生了空间电荷效应,降低PN结的内建电场,使得PN结达到电子-空穴对的分离上限,输出电流出现饱和。所以,提高光电探测器的工作范围上限,使其承受更大功率的入射光,需要减弱大注入下空穴堆积引起的空间电荷效应,从而减少空间电荷效应对结区电场的干扰。研究者们提出多种器件结构来减少或消除空间电荷效应,如采用分布或边耦合结构,通过减少光生载流子的漂移空间距离来降低光电探测器的空间电荷效应^[4-5];通过将p型高掺杂吸收层与收集层分离,使电子成为单行载流子,减少空穴堆积引起的空间电荷效应^[6]。

由于组分梯度产生的内建电场可以影响载流子的分布和运动^[7-8],本文将组分梯度产生的内建电场引入HgCdTe探测器设计中,将PN结制备在HgCdTe外延薄膜材料的高Cd组分端,利用组分梯度产生的内建电场对电子和空穴产生电场力,影响结区附近的光生载流子运动,探索降低空间电荷效应的方法。本文通过对制备在不同组分梯度下的器件变温响应光谱和变温响应率分析,研究组分梯度产生的内建电场对光生载流子运动的影响,并提出一种大注入下提高器件饱和阈值的设计思路。

1 具有组分梯度的HgCdTe外延薄膜材料

HgCdTe是三元系合金半导体($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$),其禁带宽度等光电参数会随着材料的组分发生变化,所以具有组分梯度的HgCdTe外延薄膜材料体内的组分分布会引起能隙带边的偏移,使得HgCdTe中存在一个由渐变带隙形成的内建电场。

为了获得HgCdTe外延薄膜材料组分梯度信息,可以利用多层模型和膜系传递矩阵对材料的红外透射光谱进行拟合,提取材料内纵向组分分布曲线,本文中采用的组分分布模型为^[9-10]:

$$x(z) = x_s + s(d - z) + (1 - x_s - sd) \left\{ 1 - \left[\text{erf} \left(\frac{2z}{\Delta z} \right) \right]^3 \right\} \quad (1)$$

式(1)中: $x(z)$ 为距离衬底界面为 z 处的组分; x_s 、 d 、 s 和 Δz 分别为外延层的表面组分、厚度、组分梯度以及扩散区宽度,erf为误差函数。拟合过程中,考虑到透光区透过率受表面不平整性、背景干扰和载流子浓度等影响较大,透光区的拟合以干涉条纹周期和相位为准,吸收边的拟合取自透过率开始下降到透过率为1%的波段。图1给出HgCdTe外延薄膜材料的透射光谱的拟合曲线图1(a)和Cd组分的纵向分布曲线图1(b),并提取材料的厚度、组分梯度和组分互扩散区厚度等信息。

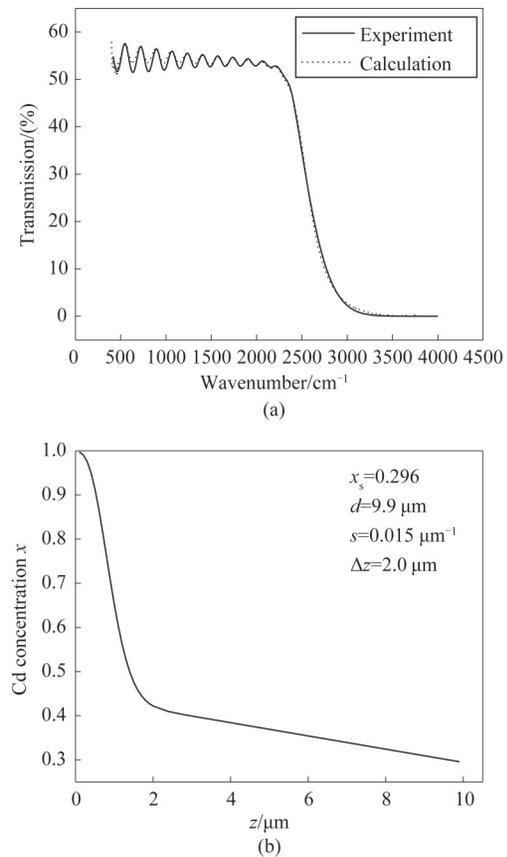


图1 HgCdTe外延薄膜材料(a)透射光谱的拟合曲线,(b)Cd组分的纵向组分分布曲线

Fig. 1 HgCdTe epitaxial material (a) transmission spectrum and theoretical fitting line, (b) longitudinal composition profile of Cd concentration

HgCdTe外延薄膜材料在 z 方向上的Cd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:

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

其中, E_g 是禁带宽度, E_g 与组分、温度的关系采用 Hansen-Schmit 提出经验公式计算^[11], q 是单位电荷。图 2 是通过提取的 Cd 组分分布曲线计算出的内建电场分布。由图 2 可知, 组分梯度产生的内建电场可分为两个区域, 一是 Cd 组分的非线性分布区, 由外延的 HgCdTe 薄膜和 CdZnTe 衬底之间的互扩散引起的, 该区域产生的内建电场较大, 最高可达 10^4 V/cm 量级; 二是 Cd 组分的线性分布区, 组分梯度产生的内建电场随着距衬底的距离增加趋于定值。

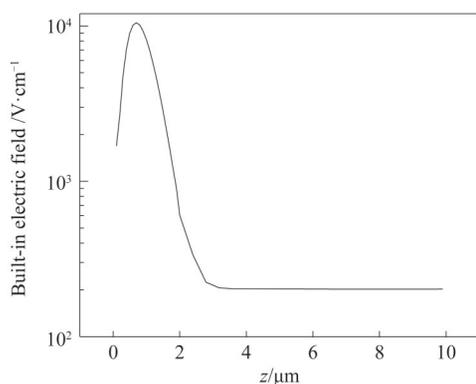


图 2 组分梯度产生的内建电场分布
Fig. 2 Distribution of built-in electric field

2 实验

等温气相外延生长是利用 CdTe 和 HgTe 的互扩散形成具有组分梯度的 HgCdTe 薄膜, 其生长原理决定了所生长的材料存在着较大的纵向组分梯度。实验中样品 A 和样品 B 采用等温气相外延技术在 CdZnTe 衬底上生长 P 型 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 薄膜外延材料, 300 K 下汞空位掺杂的浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 通过红外透射光谱测试获得的样品 A 和样品 B 的 x 分别为 0.32 和 0.316, 图 3 给出了从红外透射光谱拟合中提取的样品 A 和样品 B 中 Cd 组分的纵向分布曲线图 3(a) 和计算的组分梯度产生的内建电场图 3(b)。从图中明显看出, 样品 A 中 Cd 组分线性分布区的组分梯度大于样品 B, 且由互扩散导致的 Cd 组分非线性分布区域厚度接近 $4 \mu\text{m}$ 。

实验将 PN 结制备在 HgCdTe 外延材料的高组分端, 即外延薄膜材料和 CdZnTe 衬底的界面处, 见图 4, 组分梯度产生的内建电场 E 的方向由材料的高 Cd 组分端指向低 Cd 组分端, 和入射光方

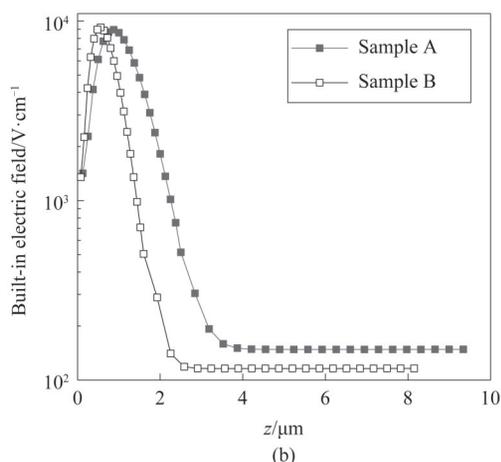
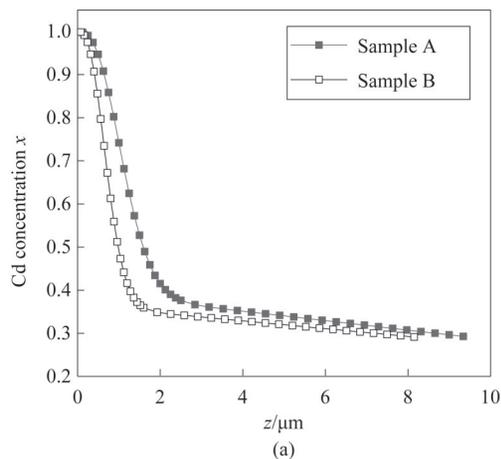


图 3 样品 A 和样品 B (a) Cd 组分纵向分布, (b) 组分梯度产生的内建电场分布
Fig. 3 Sample A and sample B (a) longitudinal composition profile of Cd, (b) distribution of built-in electric field

向一致, 电子和空穴在该内建电场下均受指向器件下表面的电场力。为了在结区附近构建两种不同大小的内建电场, 样品 A 在器件制备中保留部分非线性组分区, 样品 B 的非线性组分区全部去掉。

结合图 4 中制备器件的位置, 图 5 给出了样品的处理过程, 首先要在 HgCdTe 外延薄膜材料的生长面上利用热蒸发生长 8000 \AA CdTe, 然后用环氧树脂胶将钝化过的生长面贴在蓝宝石衬底上。依次通过粗抛、精抛和衬底腐蚀液进行去除衬底工艺, 直至表面呈现花斑条纹, 然后用 1% 溴乙醇腐蚀液漂洗, 得到光亮表面。实验中对样品 A 和样品 B 的界面腐蚀时间分别是 15 s 和 90 s, 腐蚀结束后, 样品 A 厚度为 $\sim 7.6 \mu\text{m}$, 样品 B 为 $\sim 3.7 \mu\text{m}$ 。

器件采用常规的 N-on-P 型平面结构, 通过硼离子注入在样品上形成 N 区, 硼离子注入能量

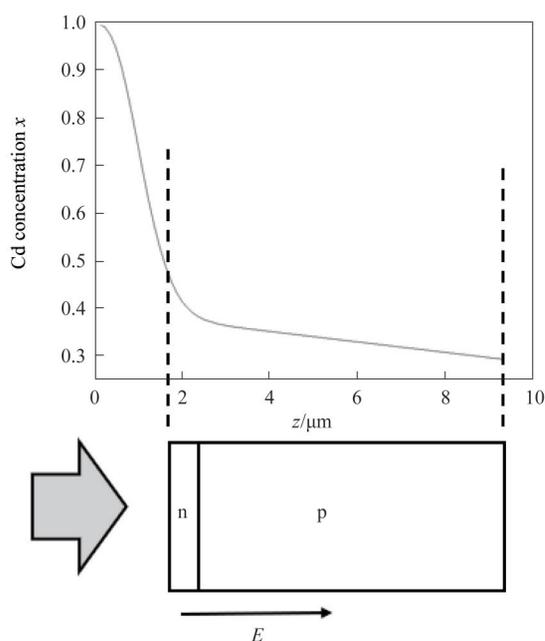


图4 器件制备位置示意图

Fig. 4 The schematic diagram of preparation position in epitaxial material

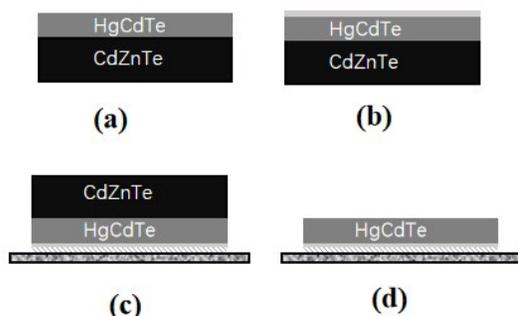


图5 样品的处理过程 (a) HgCdTe 外延薄膜, (b) 表面钝化, (c) 贴片, (d) 去除衬底

Fig. 5 The treatment process of sample (a) HgCdTe epitaxial layer, (b) passivating surface, (c) pasting onto sapphire, (d) removing substrate

为 100 keV, 注入剂量为 $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 之后在热蒸发设备中生长 CdTe/ZnS 钝化膜 $1\ 000 \text{ \AA}/2\ 000 \text{ \AA}$, 接着完成开电极孔、金属沉积等一系列工艺, 制备完成后, 样品被封装在真空杜瓦中进行性能测试。

响应光谱测试在 Varian 公司的 FTS3100 型傅里叶光谱仪上完成, 样品在 900 K 黑体下进行响应率测试。通过杜瓦中的铂电阻确定样品温度, 并采取液氮下自然升温的方法进行不同温度点

的响应光谱和响应率测试。

3 结果和讨论

3.1 归一化响应光谱

图 6 是两个样品在 115 K、215 K 和 300 K 下的归一化响应光谱, 300 K 下样品 A 和样品 B 的光谱形状是有差异的。样品 A 在 300 K 下的光谱峰值响应范围比较宽, 且截止波长附近存在很多干涉峰, 而样品 B 的光谱峰值响应比较窄, 没有干涉峰, 推测应该和样品的厚度有关。随着入射光波长的增加, HgCdTe 的吸收系数是减小的。对于小于材料截止波长的入射光, HgCdTe 的吸收系数很大, 入射光基本全部被吸收, 不会出现干涉。当波长接近材料截止波长时, 入射光在材料中的吸收系数变小, 入射光不能被充分吸收, 没有被材料吸收掉的入射光会在吸收层下表面, 即蓝宝石衬底处发生反射, 然后到达吸收层前端的互扩散界面后再次发生反射, 使得吸收层的两个面形成微弱的光学谐振腔^[12], 导致样品 A 响应光谱中出现干涉峰。而样品 B 经界面处理后的吸收层厚度太薄, 并没有形成一个完整的干涉周期, 因此没有干涉峰的存在。

除了干涉峰差异外, 还可以观察到样品 A 在短波方向有比较大的响应, 是因为短波光子在样品 A 表面处产生的大量光生载流子, 在非均匀组分分布产生的内建电场作用下, 加速向下方的结区漂移, 减少了表面复合^[13-14], 提高了短波方向的响应。通过样品 A 和样品 B 光谱差异可推断, 样品 B 表面所处的线性组分分布产生的内建电场并未形成对表面光生载流子的有效加速。

另外, 两个样品的归一化响应光谱在 115 K、215 K 和 300 K 下随温度的变化趋势也是不一样的。图 7 给出了传统 HgCdTe 器件响应光谱的截止波长随温度的变化规律^[15], 即随着温度的降低, 截止波长变长, 响应光谱向长波方向偏移。可见, 图 6(b) 中样品 B 的截止波长随温度的变化符合传统 HgCdTe 器件的变化规律, 而样品 A 的截止波长随温度的降低却呈现了相反的变化趋势, 且光谱形状也发生了明显改变, 见图 6(a), 在 300 K 时, 样品 A 光谱峰值响应范围比较宽, 随着温度的降低, 长波方向响应下降, 干涉峰减少, 峰值位置逐渐向短波方向移动, 到了 115 K 时, 干涉峰基本消失, 且截止波长接近短波段。根据样品 A 的器件结构, Cd 组分沿着入射光的方向是逐渐减小的, 光生载流子在组分梯度产生的内建电场中受指向器件下表面的作用

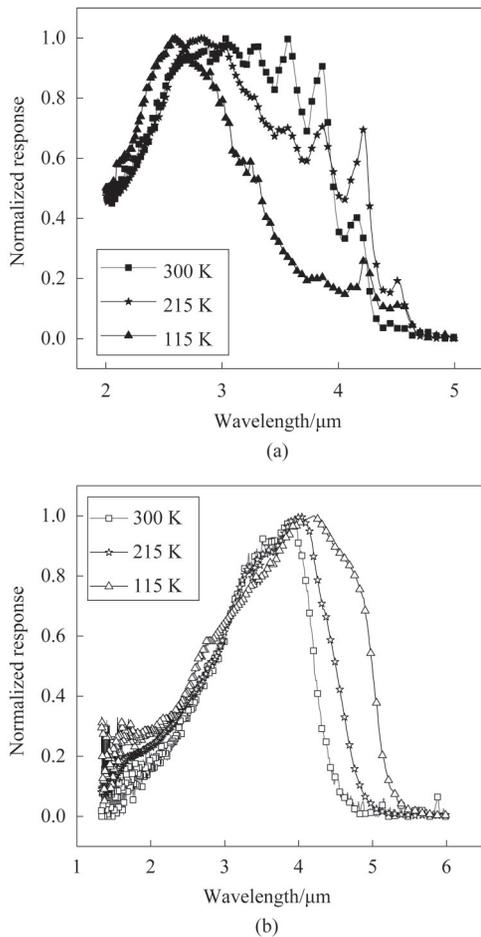


图6 115 K、215 K 和 300 K 的归一化响应光谱(a) 样品 A, (b) 样品 B
Fig. 6 Normalized response spectra at 115 K, 215 K and 300 K (a) sample A, (b) sample B

力。300 K 时,光谱中长波方向的响应来自材料中低 Cd 组分区,即蓝宝石衬底附近产生的光生载流子,尽管在组分梯度产生的内建电场中受到反向作用力,光生电子仍能通过扩散到达结区,产生光响应。随着温度的降低,通过长波方向响应的变化可以判断,衬底附近的光生电子能够到达结区的越来越少,当温度降至 115 K 时,样品 A 基本收集不到这部分光生电子,说明组分梯度产生的内建电场对光生电子的作用力随温度的降低在逐渐增强。

为了清楚认识样品 A 和样品 B 中组分梯度产生的内建电场对响应光谱的影响,图 8 计算了 115 K、215 K 和 300 K 下样品 A 和样品 B 中 Cd 组分线性分布区产生的内建电场和界面腐蚀后,样品 A 在不同温度下组分梯度产生的内建电场分布情况。计算结果表明,115 K、215 K 和 300 K 下测试的样品 A 和样品 B 的线性组分分布区产生的内建电场在 100 ~ 200 V/cm 范围内变化,且两个样品在相同温度下的

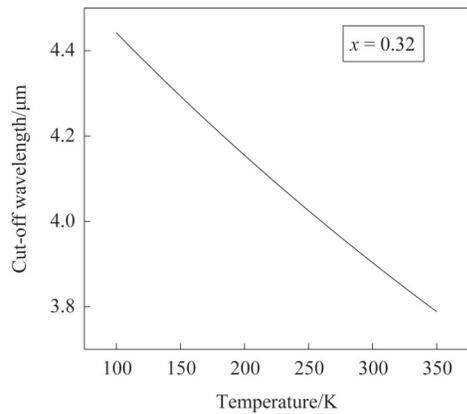


图7 截止波长随温度的变化(x=0.32)
Fig. 7 Cut-off wavelength with temperature (x=0.32)

内建电场差异为 ~ 30 V/cm,数值上相差不大。由样品 B 的响应光谱随温度的变化推断,数值在 100 ~ 200 V/cm 的内建电场不会对载流子的运动产生太大影响,所以并未改变响应光谱的变化趋势。而样品 A 内 Cd 组分的非线性分布使得表面薄层的内建电场高达 2 000 V/cm,且在 115 K、215 K 和 300 K 下,电场随温度的变化在 10² V/cm 量级,所以样品 A 中非线性组分分布产生的内建电场增强应该是导致其截止波长随温度降低向短波移动的主要原因。在样品 A 中,随着温度的降低,逐渐增强的内建电场抑制了结区下方 P 区的光生载流子的扩散运动,降低了光生电子的收集效率,所以长波方向的响应降低。同时,产生在表面的 n 区光生空穴在该内建电场作用下,加快了向结区的漂移速度,降低了表面复合,提高了短波方向的响应。

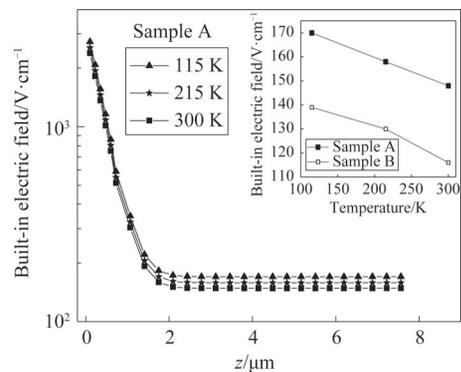


图8 不同温度下的组分梯度产生的内建电场分布
Fig. 8 Built-in electric field generated by composition gradient at different temperatures

3.2 响应率

组分梯度产生的内建电场会影响器件中光生载流子在空间上的分布和运动,进而影响器件的响

应率。图9是两个样品响应率随温度的变化曲线,随着温度的降低,热激发的本征载流子浓度迅速减少,样品B的响应率随量子效率提高而逐渐增加,但样品A的响应率变化趋势不同,其随温度的降低先升高再降低,当温度低于135 K时,样品A的响应率基本不变,且在测试温度范围内,响应率的整体变化幅度也小于样品B。结合样品A的变温响应光谱,样品A内的非线性组分分布产生的内建电场对载流子运动的改变应该是样品A响应率呈现三个变化趋势的主要原因。当温度大于215 K时,样品A和样品B的响应率变化趋势基本相同,说明非线性组分分布产生的内建电场对光生载流子的作用力没有影响到载流子的扩散运动。当温度低于215 K,非线性组分分布产生的内建电场对p区扩散过来的光生电子的排斥力逐渐增强,到达结区的光生电子越来越少,使得样品A的响应率不再继续增加而呈现下降趋势,在95~135 K温度段,样品A的响应率基本不变,说明非线性组分分布产生的内建电场增大到一定值后,PN结下方的光生电子在组分梯度产生的内建电场中受到反向作用力,无法进入结区,而PN结上方的光生空穴被加速进入结区,因此该温度范围内的光响应主要来自PN结对产生在n区和耗尽区的光生空穴的收集,且输出值趋于稳定。样品A中随温度变化的内建电场影响了光生载流子的运动,使得样品A的响应率随温度呈现三种不同的变化趋势,有效地抑制了结区对光生电子的收集。

由此可见,通过温度调控组分梯度产生的内建电场,影响光生载流子运动,可以达到降低结区内

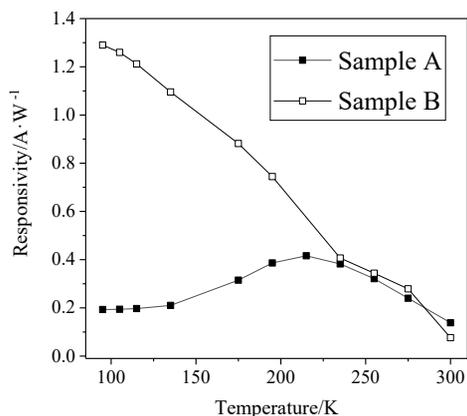


图9 样品响应率随温度的变化曲线

Fig. 9 Responsivity versus temperature in sample

光生载流子浓度和提高结区内空穴漂移速度的目的,对大注入下降低空间电荷效应是有利的,为提高HgCdTe器件的饱和阈值提供了一种新的设计思路。

4 结论

本实验通过不同界面处理时间,将PN结分别制备在HgCdTe外延薄膜材料的Cd组分非线性分布区和线性分布区的高组分端,研究了具有组分梯度的HgCdTe探测器的光电特性。通过不同温度下光电性能测试,发现两个样品的光电性能随温度的变化趋势不同。计算不同温度下两个样品中组分梯度产生的内建电场,结果表明样品A中非线性组分分布产生的内建电场对光生载流子运动的影响是引起光电性能差异的主要原因。通过响应率的变温曲线分析,说明将PN结制备在非线性分布区的高Cd组分端,随着温度降低,逐渐增强的内建电场使得样品响应率呈现了三种不同的变化趋势,实现了对光生少数运动的改变。通过温度调控Cd组分非线性分布产生的内建电场,可以降低结区内光生载流子浓度和提高结区内空穴漂移速度,有利于降低空间电荷效应,为大注入下提高HgCdTe探测器的饱和阈值提供了一种新的设计思路。

References

- [1] Liu P L, Williams K J. Saturation characteristics of fast photodetectors [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(7): 1297-1303.
- [2] GUO Jian-Chuan, ZUO Yu-Hua, ZHANG Yun, *et al.* Theoretical analysis and experimental study of the space-charge-screening effect in uni-traveling-carrier photodiode [J]. *Acta Physica Sinica.* (郭剑川,左玉华,张云,等。单行载流子光电探测器中空间电荷屏蔽效应理论分析和实验研究。 *物理学报*), 2010, **59**(7): 4524-4528.
- [3] DOU Xian-An, SUN Xiao-Quan, WANG Zou-Lai. Experimental research on saturation characteristics of silicon p-i-n photodiode induced by femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (豆贤安,孙晓泉,汪作来。飞秒激光诱发硅PIN光电二极管饱和特性的实验研究。 *量子电子学报*), 2012, **29**(6): 671-676.
- [4] Lin L Y, Wu M C, Itoh T, *et al.* Velocity-matched distributed photodetectors with high-saturation power and large bandwidth [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **8**(10): 1376-1378.
- [5] Umbach A, Trommer D, Mekonnen G G, *et al.* Waveguide integrated 1.55 μm photodetector with 45 GHz bandwidth [J]. *Electronics Letters*, 2002, **32**(23): 2143-2145.
- [6] Nellen S, Ishibashi T, Deninger A, *et al.* Experimental comparison of UTC- and PIN-photodiodes for continuous-wave terahertz generation [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, **41**(4): 343-354.

- [7] Rosenfeld D, Garber V, Bahir G. Quantum efficiency and spectral response of compositionally graded HgCdTe P-n heterojunction photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, **76**(7): 4399-4406.
- [8] Singh A, Shukla A K, Pal R. Performance of graded band-gap HgCdTe avalanche photodiode [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, **64**(3):1146-1152.
- [9] WANG Qing-Xue, WEI Yan-Feng, YANG Jian-Rong, *et al.* Effect of LPE-HgCdTe composition on uniformity on infrared transmission spectra [J]. *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): 904-909.
- [10] CUI Bao-Shuang, WEI Yan-Feng, SUN Quan-Zhi, *et al.* Effect of composition distribution in the HgCdTe film on spectral response of device [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (崔宝双, 魏彦锋, 孙权志, 等。HgCdTe 薄膜材料组分分布对器件响应光谱的影响。《红外与毫米波学报》), 2013, **32**(3): 225-230.
- [11] 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]. *Journal of Applied Physics*, 1982, **53**(10): 7099-7101.
- [12] Lee D L. Modeling of Optical Response in Graded Absorber Layer Detectors [J]. *Journal of electronic materials*, 2006, **35**(6): 1423-1428.
- [13] Mangin L, Rochette F, Lobre C, *et al.* Analysis of the electrical properties of different HgCdTe passivation for infrared detectors [J]. *Journal of electronic materials*, 2019, **48**(10):6084-6092.
- [14] LU Q, WANG X, WEI Y F, *et al.* Investigation of the influence of graded-gap layer formed by annealing on the electrical properties of the near-surface of LPE HgCdTe using MIS structure [J]. *Materials Research Express*, 2021, **8**(1):15903.
- [15] CHEN Bo-Liang, LI Xiang-Yang. *Infrared imaging detectors for space application* [M]. Beijing: Science Press, 2016, 19-20. (陈伯良, 李向阳。《航天红外成像探测器》北京:科学出版社, 2016, 19-20.)