

具有组分梯度的HgCdTe探测器在激光测量中的潜在应用

徐国庆 王仍 陈心恬 乔辉 杨晓阳 储开慧 王大辉 杨鹏翎 李向阳

Potential application of HgCdTe detector with composition gradient in laser measurement

XU Guoqing, WANG Reng, CHEN Xintian, QIAO Hui, YANG Xiaoyang, CHU Kaihui, WANG Dahui, YANG Pengling, LI Xiangyang

引用本文:

徐国庆, 王仍, 陈心恬, 等. 具有组分梯度的HgCdTe探测器在激光测量中的潜在应用[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 549–556. DOI: 10.5768/JAO202445.0310009

XU Guoqing, WANG Reng, CHEN Xintian, et al. Potential application of HgCdTe detector with composition gradient in laser measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 549–556. DOI: 10.5768/JAO202445.0310009

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

APD探测器模块性能及噪声检测

Detection of performances and noise of APD detector module

应用光学. 2019, 40(6): 1115–1119 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0603006>

多组分复合薄膜的光学、电学、机械性能及其应用

Optical, electrical and mechanical properties and applications of multicomponent composite films

应用光学. 2020, 41(2): 405–420 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205005>

激光辐照碲镉汞红外焦平面探测器的热应力损伤研究

Thermal-stress damage of MCT infrared focal plane array detector caused by laser irradiation

应用光学. 2018, 39(5): 751–756 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0506003>

减反膜的梯度化与激光损伤阈值之间的关系研究

Relationship between gradient of antireflection film and laser induced damage threshold

应用光学. 2019, 40(1): 143–149 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107003>

激光干扰红外成像系统的噪声等效温差及信噪比分析

NETD and SNR analysis of laser jamming infrared imaging system

应用光学. 2017, 38(6): 990–994 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0606001>

基于超连续光源的InGaAs探测器相对光谱响应度定标技术

Relative spectral responsivity calibration technology of InGaAs photodetector based on super-continuum light source

应用光学. 2021, 42(4): 709–716 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0549-08

具有组分梯度的 HgCdTe 探测器在激光测量中的潜在应用

徐国庆¹, 王 仍¹, 陈心恬¹, 乔 辉¹, 杨晓阳¹, 储开慧¹, 王大辉², 杨鹏翎², 李向阳¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 该文将组分梯度引入 HgCdTe 探测器结构设计中, 提出了一种可以降低 PN 结附近热激发载流子浓度的方法。建立暗电流机制模型, 分析高温下暗电流成份, 分析结果表明, 降低热激发载流子浓度对结区的影响是提高器件工作温度的关键。利用组分梯度在 PN 结附近构建不同的电场, 不同电场下样品暗电流和噪声电流随温度的变化曲线表明, 构建的电场越强, 降低结区附近热激发载流子浓度的效果越明显。通过数据分析, 提出构建 10^3 V/cm 量级的组分梯度内建电场可抑制热激发载流子向结区的扩散运动, 有效地降低结区附近热激发载流子浓度。

关键词: 组分梯度内建电场; HgCdTe 外延薄膜材料; 热激发载流子浓度; 暗电流; 噪声电流

中图分类号: TN215

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0310009

Potential application of HgCdTe detector with composition gradient in laser measurement

XU Guoqing¹, WANG Reng¹, CHEN Xintian¹, QIAO Hui¹, YANG Xiaoyang¹, CHU Kaihui¹,
WANG Dahui², YANG Pengling², LI Xiangyang¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Institute of Northwest Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The composition gradient was introduced into the structure design of HgCdTe detector, and a method was proposed to reduce the thermally excited carrier concentration near PN junction. The model of dark current mechanism was established, and the analysis of dark current components at high temperature showed that reducing the influence of the thermally excited carrier concentration on the junction was the key to improve the operating temperature of the detector. Different electric fields were built near the PN junction by using the composition gradient. The curves of dark current and noise of the sample with temperature under different electric fields show that the stronger the electric field is, the more obvious the effect of reducing the thermally excited carrier concentration near the junction. Based on the data analysis, it is proposed that the built-in electric field generated by the composition gradient of 10^3 V/cm can inhibit the diffusion movement of thermally excited carriers to the junction region, which effectively reduce the concentration of thermally excited carriers near the junction region.

Key words: built-in electric field of composition gradient; HgCdTe epitaxial material; thermally excited carrier concentration; dark current; noise

引言

红外、激光在大气中传输时具有很高的透过率, 可以实现远距离能量有效传输, 因而在光电对

抗、目标识别与探测、大气环境监测和光谱监测分析等领域具有广阔的应用前景^[1-4]。随着红外、激光在各个领域的逐渐深入应用, 面向红外、激光的

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-11-14

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目 (12227901)

作者简介: 徐国庆 (1979—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事红外碲镉汞探测器研究。E-mail: xuguoqing@mail.sitp.ac.cn

功率计的需求与日俱增。测量激光的功率计主要分两种：一种是用热电堆探头实现热电转换，光谱响应曲线平坦，但响应时间长，不适合高速光信号检测；另一种是用光电二极管探头实现光电检测，响应波段虽窄，但响应速度快，探头有 Si、Ge、InGaAs 和 HgCdTe 等类型，覆盖了可见光到红外波段范围。目前国内激光功率计的光电探头大多以 Si/Ge 光电二极管为主，测量波长在 400 nm~1 800 nm，而面向中红外、激光测量的功率计，由于技术上受限于光电二极管探头的开发，国内市场尚属空白，该波段的功率计产品基本被国外公司垄断。

HgCdTe 是直接带隙三元系合金半导体 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)，材料的吸收系数大，禁带宽度连续可调，通过改变 Cd 组分 x ，可以覆盖整个红外波段探测。由于 HgCdTe 是窄禁带半导体，环境温度下的热能量会使电子发生从价带到导带的跃迁，产生热载流子，属于器件中的噪声因素，当温度升高产生的热载流子严重干扰光生载流子时，器件将无法工作。因此，HgCdTe 探测器通常需要制冷，文献报道^[5-6]中波 HgCdTe 探测器的工作温度可以提高到 250 K 左右。在考虑生产成本和便携性的商用化领域，制冷需求阻碍了 HgCdTe 探测器在功率计探头上的开发。因此，抑制高温下结区附近的热激发载流子浓度，提高探测器的工作温度，是拓展 HgCdTe 探测器在功率计领域应用^[7-8]的关键。

由于组分梯度产生的内建电场可以影响载流子的运动和分布，HgCdTe 器件中常常利用组分梯度产生的内建电场抑制界面或表面复合^[9-10]。本文将组分梯度引入 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，利用组分梯度在 PN 结附近构建不同的电场，影响结区附近的载流子运动，探索降低结区附近热激发载流子浓度的方法，提高器件的工作温度。本文通过建立暗电流机制模型，分析近室温工作的探测器暗电流的主要来源。通过不同组分梯度下器件的暗电流和噪声分析，研究组分梯度内建电场对结区附近热激发载流子浓度的抑制作用，并分析该器件结构应用于激光测量领域的可行性。

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 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)，以 CdTe 材料为基准，300 K 温度下 HgCdTe 材料价带顶 E_v 的向上偏移量和导带底 E_c 的向下偏移量

分别为^[11]

$$\Delta E_v = 0.45(1-x) \quad (1)$$

$$\Delta E_c = 1.21(1-x) \quad (2)$$

如果通过调整 HgCdTe 薄膜材料的生长条件，使得 Cd 组分 x 在生长过程中不断变化，就会得到组分渐变的 HgCdTe 薄膜层。以 CdTeZn 衬底上外延 HgCdTe 薄膜为例，Cd 组分从生长开始的衬底面向表面不断变小，该组分渐变层能带示意图如图 1 所示。Cd 组分的不断变化，使得外延的 HgCdTe 薄膜中存在一个由渐变带隙形成的内建电场，且电子和空穴在准静电场下受到相同方向的作用力。

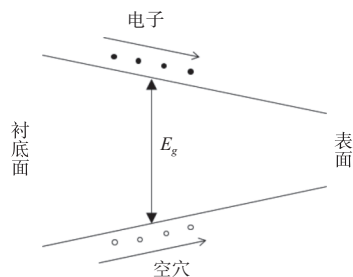


图 1 组分渐变层能带示意图

Fig. 1 Energy band diagram of composition gradient layer

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，就可以得到材料内纵向组分分布曲线，提取 HgCdTe 外延薄膜材料组分梯度信息。本文中采用的组分分布模型为^[12-13]

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

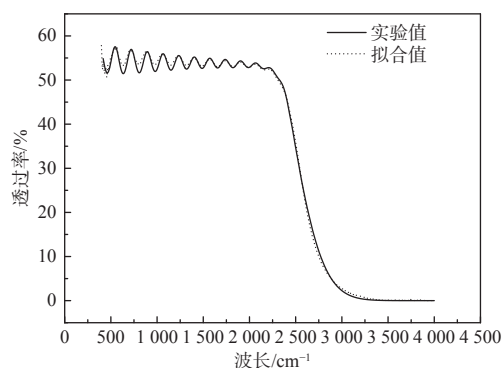
式中： $x(z)$ 为距离衬底界面 z 处的组分； x_s 、 d 、 s 和 Δz 分别为外延层的表面组分、厚度、组分梯度以及扩散区宽度； erf 为误差函数。

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 2 给出 HgCdTe 外延薄膜材料的透射光谱和理论拟合曲线(图 2(a))以及 Cd 组分的纵向分布曲线(图 2(b))，并给出提取材料的厚度、组分梯度和组分互扩散区厚度等信息。HgCdTe 外延薄膜材料在 z 方向上的组分分布会引起禁带宽度在 z 方向上变化，进而会产生内建电场：

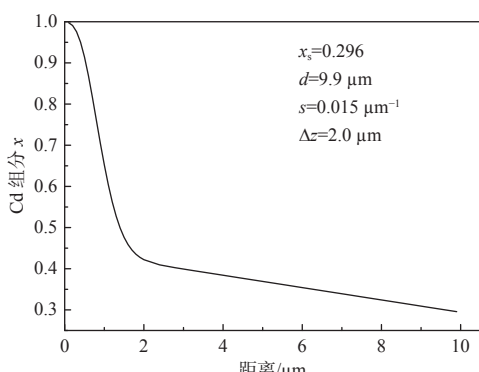
$$E = \frac{1}{q} \frac{dE_g}{dz} \quad (4)$$

式中： E_g 为禁带宽度， E_g 与组分、温度的关系采用

Hansen-Schmit 提出的经验公式计算^[14]; q 为单位电荷。图 3 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 3 可知, 组分梯度产生的内建电场可分为 2 个区域: 一是 Cd 组分的非线性变化区, 由外延的 HgCdTe 薄膜和 CdTeZn 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 组分的线性变化区, 组分梯度产生的内建电场随着离衬底的距离增加趋于定值。



(a) 透射光谱和理论计算曲线



(b) 纵向组分分布曲线

图 2 HgCdTe 外延薄膜材料

Fig. 2 HgCdTe epitaxial material

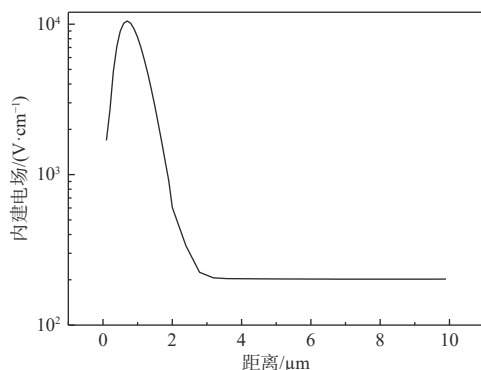
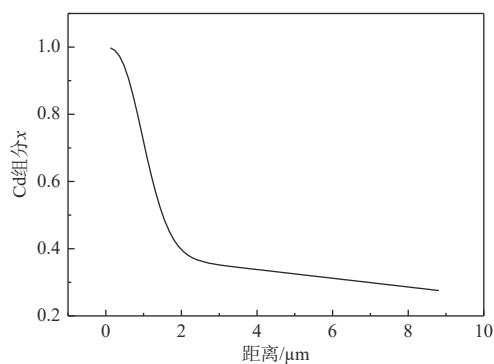


图 3 组分梯度产生的内建电场分布

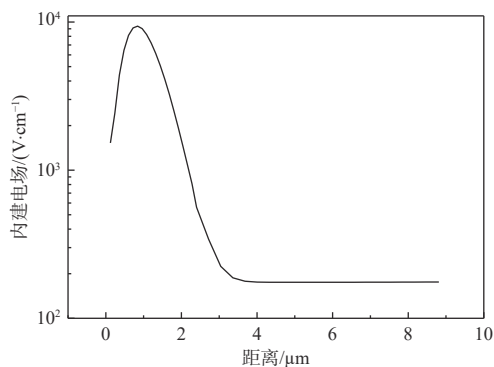
Fig. 3 Distribution of built-in electric field generated by composition gradient

2 实验

等温气相外延 (VPE) 是利用 CdTe 和 HgTe 的互扩散形成具有组分梯度的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 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。本实验选用 VPE 技术在 CdTeZn 衬底上生长 P 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 薄膜, 汞空位掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。通过红外透射光谱测得材料组分为 0.299, 图 4 给出了从红外透射光谱拟合中提取 Cd 组分的纵向分布曲线(图 4(a))以及计算的组分梯度产生的内建电场(图 4(b))。从图 4 可以看出, 材料中线性 Cd 组分梯度产生的内建电场约为 175 V/cm, 互扩散导致的非线性 Cd 组分梯度产生的内建电场较大, 最高达 10^4 V/cm, 厚度近 $3.5 \mu\text{m}$ 。实验中, 材料被划成 3 片, 在界面不同的组分梯度区域内制备 PN 结, 用于分析组分梯度产生的内建电场对载流子运动的影响。



(a) Cd 组分纵向分布



(b) 组分梯度产生的内建电场分布

图 4 Cd 组分纵向分布和组分梯度产生的内建电场分布

Fig. 4 Longitudinal composition profile of Cd and distribution of built-in electric field generated by composition gradient

与传统 n-on-p 器件制备 PN 结位置不同, 为了获得界面处较强组分梯度内建电场, 实验中需要去除 CdTeZn 衬底, 将 PN 结制备在 HgCdTe 外延材料的高组分端, 即外延薄膜和 CdTeZn 衬底的界面处, 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,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影响。去除衬底后,用专用腐蚀液腐蚀界面,通过控制腐蚀的时间,将划片后的样品分别去除 5 μm 、2.0 μm 和 1.5 μm ,记作样品 A、样品 B 和样品 C。图 5 给出了 PN 结在样品中制备的位置。根据图 4(b)计算出样品 A 处于 Cd 组分线性变化区,组分内建电场约为 175 V/cm,而样品 B 和样品 C 的界面处理较少,使得 2 个样品的近表面处于 Cd 组分非线性变化区,组分梯度内建电场更大一些。考虑到工艺和测量误差,估算样品 B 表面所处电场在 1000 V/cm~2 000 V/cm 范围内,样品 C 表面所处电场在 3000 V/cm~4000 V/cm 范围内。

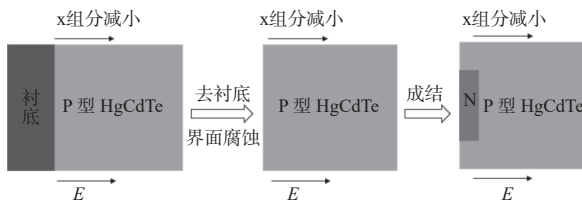


图 5 样品中 PN 结制备的位置

Fig. 5 Preparation position of PN junction in sample

器件采用硼离子注入在 P 型 HgCdTe 上形成 N 区,之后在热蒸发设备中生长 CdTe/ZnS 钝化膜,接着完成开电极孔、金属沉积等一系列常规工艺。器件封装在真空杜瓦中,通过 TEC 制冷或制热实现不同温度点下测试,采用定标过的 Pt 电阻进行温度测量。测噪声时,杜瓦放置在金属屏蔽盒中,测得的电信号经跨阻放大器放大成电压信号,通过均方根电压表读出,整个过程由示波器监控。电流电压测试用 Keithley 236 SourceMeter,测量用电压触发,同时测量电压和电流,电流测量的精确率为 100 pA,分辨率高于 20 pA。

3 结果和讨论

HgCdTe 是窄禁带半导体,随着工作温度的升高,本征热激发载流子浓度指数增加。HgCdTe 材料的本征载流子浓度与温度之间满足如下关系^[15]:

$$n_i = (5.85 - 3.82x + 0.001753T - 0.001364xT) \cdot \left[10^{14} E_g^{0.75} T^{1.5} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \right] \quad (5)$$

组分 x 为 0.299 时,本征载流子和温度之间的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出,当 HgCdTe 探测器工作在近室温时,半导体存在着近本征化的严重趋势。因此,实现 HgCdTe 探测器的高温工作,必须找到有效抑制热激发载流子浓度的方法。

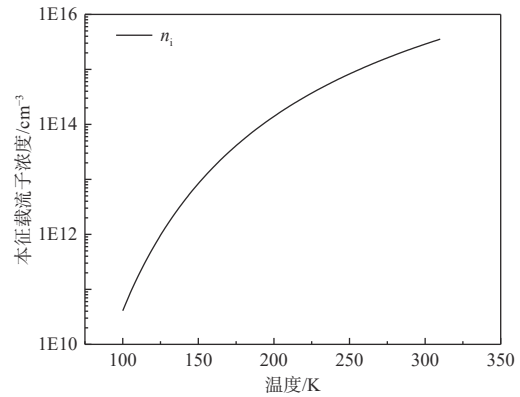


图 6 $x=0.299$ 时本征载流子浓度随温度的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of intrinsic carrier concentration with temperature when $x=0.299$

3.1 高温工作下影响暗电流的主要机制

HgCdTe 器件性能受到器件暗电流水平的限制,随着工作温度的升高,暗电流急剧增加,致使器件无法正常工作,所以暗电流的有效抑制是提升探测器工作温度的关键。本文通过建立暗电流模型,分析高温工作下影响器件性能的主要暗电流机制,探索提高工作温度的方法。

根据暗电流的产生机理可知,暗电流主要包括:扩散电流、产生-复合电流、陷阱辅助隧穿电流,由于直接隧穿电流是发生在大偏置下,这里不再考虑。3 种主要暗电流成份的表达式如下^[16-21]:

1) 扩散电流

扩散电流是 p-n 结二极管的基本电流机制,它主要产生于耗尽区两侧 1 个少子扩散长度内的电子-空穴对的随机热产生与复合过程,其和材料本身的特点关系更为直接,对于耗尽区的细节不敏感。以 n-on-p 型为例,其表达式可以写成:

$$I_{\text{diff}} = \frac{qAn_i^2}{N_a} \left(\frac{kT}{q} \frac{\mu_n}{\tau_n} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot C \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

式中: $C = (S\tau_n \cosh\left(\frac{d}{L_n}\right) + L_n \sinh\left(\frac{d}{L_n}\right)) / (S\tau_n \sinh\left(\frac{d}{L_n}\right) + L_n \cosh\left(\frac{d}{L_n}\right))$ 为由表面产生-复合速率 S 和 P 区厚度 d 所决定的因子; A 为光敏元面积; L_n 为少子扩散长度; V 为外加电压; q 代表电子电荷; k 为 Boltzmann 常数; T 为器件的温度; τ_n 为少子寿命; μ_n 为少子迁移率; N_a 为 P 区掺杂浓度。

2) 产生复合电流

产生复合电流指的是空间电荷区内,载流子的激发和载流子的复合产生的电流,其主要与空间电荷区的杂质和缺陷密度,以及缺陷能级相关。产生复合电流又可以分开来讲,产生电流就是在

空间电荷区内热激发形成的非平衡载流子, 在复合前被 PN 结内建电场分开, 分别注入 P 区和 N 区形成的反向电流; 复合电流则是 P 区和 N 区的少子在穿越空间电荷区时受杂质和缺陷影响, 发生复合所形成的电流, 其简化后的模型可以表示为

$$I_{g-r} = \frac{qAn_iW_{dep}V}{V_i\tau_{g-r}} \quad (7)$$

式中: A 为结面积; τ_{g-r} 为产生-复合寿命; W_{dep} 为耗尽层宽度, 其表达式为

$$W_{dep} = \left[\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_i V_i (N_a + N_d)}{qN_a N_d} \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\tau_{g-r} = \frac{1}{N_{c,v} v_{th} \sigma \exp(-E_t/kT)} \quad (9)$$

式中: $V_i = V_{bi} - V$; $V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$; V_{bi} 为 p-n 结内建电场电势; V 为外加电压。

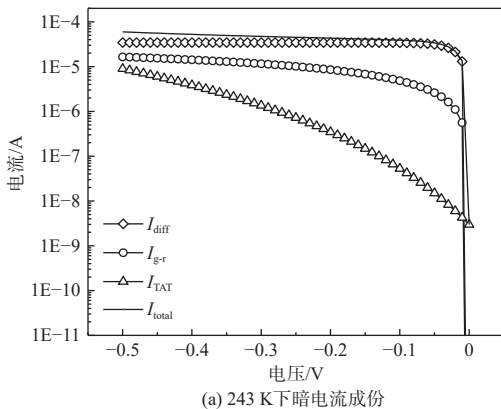
3) 缺陷辅助隧穿电流

缺陷辅助隧穿电流是指载流子从价带先跃迁到空间电荷区的缺陷能级上, 然后通过热激发或者隧穿到达导带, 从而形成的电流。可以表示为

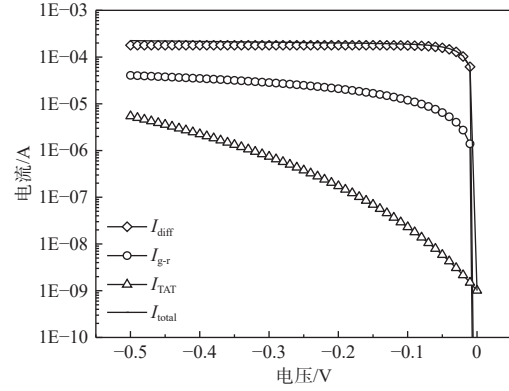
$$I_{TAT} = \frac{A\pi^2 q^2 N_i (m^*/m_0) M^2 (V_{bi} - V)}{h^3 (E_g - E_t)} \exp\left[-\frac{\sqrt{3}E_g^2 F(a)}{8\sqrt{2}qPE}\right] \quad (10)$$

式中: $F(a) = \frac{\pi}{2} + \sin^{-1}(1-2a) + 2(1-2a)\sqrt{a(1-a)}$; $a = E_t/E_g$; P 为 Kane 矩阵元, $P = 8.49 \times 10^{-8} \text{ eVcm}$; $(m^*/m_0)M^2 = 1 \times 10^{-23} \text{ eV}^2\text{cm}^3 = 2.56 \times 10^{-61} \text{ J}^2\text{cm}^3$ 。从表达式可知, 影响缺陷辅助隧穿电流的主要是材料的禁带宽度 E_g 、深能级 E_t 和深能级缺陷密度 N_i 。

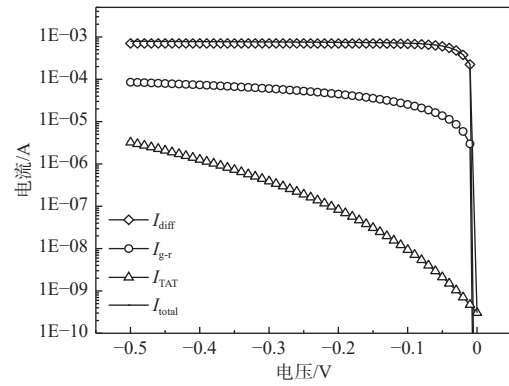
对 x 为 0.299 的 HgCdTe 探测器的各种暗电流成分进行计算, 其结果如图 7 所示, 计算过程中参考了材料的电学参数。从图 7 可以看出, 器件工作在 243 K、273 K 和 303 K 温度时扩散电流占暗电流的主要支配地位。



(a) 243 K 下暗电流成份



(b) 273 K 下暗电流成份



(c) 303 K 下暗电流成份

图 7 不同温度下的暗电流成份

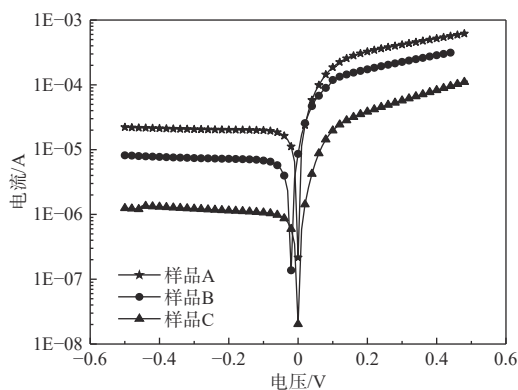
Fig. 7 Dark current component at different temperatures

3.2 组分梯度内建电场对暗电流和噪声的影响

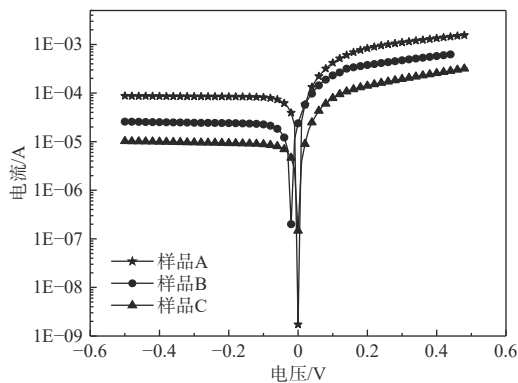
从暗电流成分计算结果看, HgCdTe 探测器在 243 K、273 K 和 303 K 温度下的暗电流都是以扩散电流为主, 由于扩散电流与本征载流子浓度的平方成正比, 所以高工作温度下器件暗电流水平反映的是热激发载流子的浓度。因此, 可以通过分析不同组分下样品的暗电流, 研究不同组分梯度产生的内建电场对结区附近热激发载流子浓度的抑制作用。

3 个样品在 243 K、273 K 和 303 K 温度下电流随电压的变化曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 样品 A 处于 Cd 组分线性变化区, 组分梯度在体内产生的内建电场为 175 V/cm; 3 个温度下样品 A 在反向偏置下的电流比图 7 的计算值略小一点, 比较接近计算值。另外, 所测的每个温度下样品 B 和样品 C 在反向偏置下的电流都要比样品 A 小很多, 且表面电场越强, 暗电流越小。对于样品 B 和样品 C, 常规注入结区深度在 $1.0 \mu\text{m} \sim 1.5 \mu\text{m}$, 推算组分梯度在样品 B 和样品 C 的结区附近产生的电场高达 10^3 V/cm 量级, 暗电流的降低说明构建的电场影响到了热激发载流子的运动。组分梯

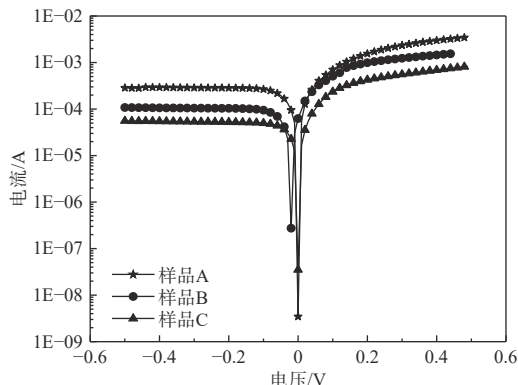
度产生的内建电场的方向沿着 Cd 组分由大到小的方向指向器件下表面,该方向正好与结下方吸收 P 区内热激发载流子向结区的扩散方向相反,推测较强的组分梯度产生的内建电场抑制了结区下方热激发载流子向结区的扩散,降低了 P 区 1 个扩散长度范围内到达结区的热激发载流子浓度。因此,样品 B 和样品 C 的暗电流比样品 A 低,且组分梯度产生的内建电场越强,抑制作用越明显。随着温度的降低,样品 C 中对热激发载流子扩散运动的抑制作用逐渐增强。



(a) 243 K 下样品电流随电压的变化曲线



(b) 273 K 下样品电流随电压的变化曲线



(c) 303 K 下样品电流随电压的变化曲线

图 8 不同温度下样品电流随电压的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of current with voltage in sample at different temperatures

为了量化分析组分梯度产生的内建电场的作用,计算了样品 C 在 243 K、273 K 和 303 K 温度下表面电场的变化,如图 9 所示。从图 9 可以看出,随着温度的降低,表面电场增加了约 200 V/cm。由于样品 C 在 PN 结制备前去除界面较少,使得 PN 结完全处在 Cd 组分的非线性变化区内,此处产生的电场更强,抑制热激发载流子向结区扩散的效果更加明显。

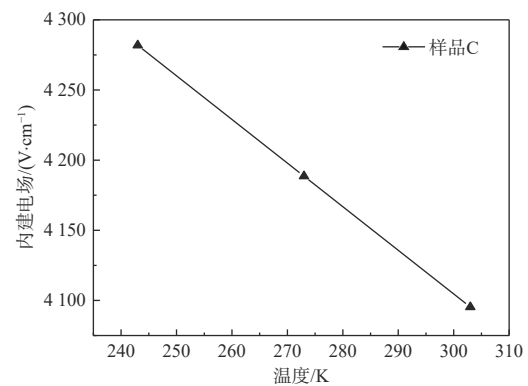


图 9 样品 C 在不同温度下的表面电场

Fig. 9 Surface electric field in sample C at different temperatures

HgCdTe 探测器噪声的主要来源有热噪声、散粒噪声、 $1/f$ 噪声及随机电报噪声等。当探测器工作在高温时,热噪声、与暗电流相关的噪声和 $1/f$ 噪声都会随着温度的升高而快速增大。另外,高浓度的本征热激发载流子使得位错缺陷等对载流子的俘获和发射概率增大,随机电报噪声也随之增大。因此,样品在不同温度下的噪声电流也能反映组分梯度产生的内建电场对结区附近热激发载流子浓度的抑制作用。

3 个样品在 223 K~323 K 温度范围内噪声电流的变化曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,3 个样品的噪声电流随温度的升高逐渐增大。对比 3 个样品的噪声电流,和暗电流变化规律一致,结区附近组分梯度产生的内建电场越大,噪声电流越小,说明组分梯度内建电场对结区附近的热激发载流子浓度起到了抑制作用。样品 B 和样品 C 的噪声电流在 250 K 前后随温度的变化是不同的,可能与组分梯度产生的内建电场和热激发载流子浓度两者随温度的变化有关。随着温度的降低,热激发载流子浓度降低,而组分梯度产生的内建电场是增加的。当温度小于 250 K,样品 B 和样品 C 中,组分梯度产生的内建电场对结附近热激

发载流子浓度的抑制作用相当, 噪声电流随温度的变化缓慢。当温度大于 250 K 时, 热激发载流子浓度增加, 组分梯度产生的内建电场变小, 噪声电流迅速增加。这个现象在样品 A 噪声电流随温度的变化中并未体现出来, 说明样品 A 体内的组分梯度产生的内建电场不足以改变载流子的运动。

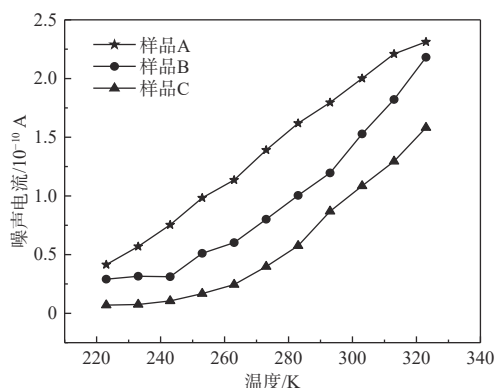


图 10 噪声随温度的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of noise with temperature

综上所述, 通过器件设计, 引入组分梯度, 利用组分梯度产生的内建电场抑制吸收区内热激发载流子向结区的扩散运动, 通过降低结区附近热激发载流子浓度, 降低器件的暗电流和噪声, 从而达到提高器件工作温度的目的。在器件内部, 光激发的载流子和热激发的载流子并没有本质的不同。因此, 该器件结构设计同样可以有效降低结区附近光激发的载流子浓度, 对大注入下提高 HgCdTe 探测器的饱和阈值是有利的。

4 结论

本文将 PN 结制备在 HgCdTe 气相外延材料的 Cd 组分非线性分布区和线性分布区的高组分端, 在结区附近构建不同强度的电场, 通过分析不同电场下样品的暗电流和噪声电流随温度的变化, 提出在结区构建 10^3 V/cm 量级的电场可抑制热激发载流子向结区的扩散运动, 降低器件暗电流, 对提高器件工作温度是有利的。由于光生载流子和热激发载流子在器件体内并无差异, 该结构也可抑制过剩载流子对结区的干扰, 有望提高大注入下 HgCdTe 探测器的饱和阈值。利用组分梯度产生的内建电场改变载流子运动和分布的器件结构, 对中红外激光测量的功率计探头设计具有重要参考意义。

参考文献:

- [1] MOULTON P, DERGACHEV A, ISYANOVA Y, et al. Recent advances in solid state lasers and nonlinear optics for remote sensing[C]//Conference on Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III. Bellingham, USA: International Society for Optical Engineering, 2003: 193-202.
- [2] GUO B J, WANG Y, PENG C, et al. Laser-based mid-infrared reflectance imaging of biological tissues[J]. *Optics Express*, 2004, 12(1): 208-219.
- [3] 范晋祥. 美国弹道导弹防御系统的红外系统与技术的发展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 536-540.
FAN Jinxiang. Status quo and trend of infrared system and technologies for America's ballistic missile defense system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 536-540.
- [4] KE L T, FENG K, WANG W T, et al. Near-GeV electron beams at a few per-mille level from a laser wakefield accelerator via density-tailored plasma[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(21): 214801.
- [5] LEE D. High-operating temperature HgCdTe: a vision for the near future[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, 45(9): 4587-4595.
- [6] JERRAMA P. Teledyne's high performance infrared detectors for space missions[C]// International Conference on Space Optics. USA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2018: 111803D.
- [7] 陈端云, 苏素燕, 林彧茜, 等. 光功率计发展现状的探讨与研究[J]. *计量与测试技术*, 2023, 50(6): 1-4.
CHEN Duanyun, SU Suyan, LIN Yuqian, et al. Discussion and research on the development of optical power meter[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2023, 50(6): 1-4.
- [8] 陈舒凡, 房丰洲. 激光功率计发展及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 33-46.
CHEN Shufan, FANG Fengzhou. Development and application of laser power meter[J]. *Laser Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 33-46.
- [9] 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.
- [10] SINGH A, SHUKLA A K, PAL R. Performance of graded bandgap HgCdTe avalanche photodiode[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(3): 1146-1152.

- [11] 杨建荣. HgCdTe材料物理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 16.
YANG Jianrong. Physics and technology of HgCdTe materials[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2012: 16.
- [12] 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[J]. 半导体学报, 2005, 26(5): 904-909.
WANG Qingxue, WEI Yanfeng, YANG Jianrong et al. Effect of LPE-HgCdTe composition on uniformity on infrared transmission spectra[J]. Journal of Semiconductors, 2005, 26(5): 904-909.
- [13] 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[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(3): 225-230.
CUI Baoshuang, WEI Yanfeng, SUN Quanzhi, et al. Effect of composition distribution in the HgCdTe film on spectral response of device[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(3): 225-230.
- [14] 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.
- [15] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 289-290.
CHU Junhao. Narrow-gap semiconductor physics[M]. Beijing: Science Press, 2005: 289-290.
- [16] KIM Y H, KIM T S, REDFERN D A, et al. Characteristics of gradually doped LMIR diodes by hydrogenation [J]. Journal of Electronic Materials, 2000, 29(6): 859-864.
- [17] 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(6): 317-326.
- [18] HU W D, CHEN X S, YIN F, et al. Analysis of temperature dependence of dark current mechanisms for long-wavelength HgCdTe photovoltaic infrared detectors[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(10): 104502-104506.
- [19] NGUYEN T, MUSCA C A, DELL J M, et al. Dark currents in long wavelength infrared HgCdTe gated photodiodes[J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33(6): 621-629.
- [20] QUAN Z J, CHEN X S, HU W D, et al. Modeling of dark characteristics for long-wavelength HgCdTe photodiode[J]. Optical and Quantum Electronics, 2006, 38: 1107-1113.
- [21] GOPAL V, GUPTA S, BHAN R K, et al. Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride n^+-p junctions[J]. Infrared Physics and Technology, 2003, 44(2): 143-152.