

文章编号:1001-5078(2022)09-1378-06

· 红外材料与器件 ·

高温下 $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 红外探测器特性分析

杜鹏飞, 叶 伟

(陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001)

摘 要:非冷却热探测器的性能在光谱检测应用中仍需要提高。为了降低热噪声和减小暗电流,实现器件的高温工作性能,本文通过将器件的倍增层和吸收层分离设计后,选用 $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$ 作为倍增层材料,利用仿真软件 Silvaco-TCAD,详细探究了不同温度对器件暗电流和光响应度的影响规律。结果表明,在高温 160~300 K 范围内,随着温度的升高,器件的暗电流增大,光响应度呈现先增大后减小的变化。利用公式进一步计算出, -500 mV 和 300 K 时,器件的暗电流密度为 $0.485 \text{ A}/\text{cm}^2$, $1.5 \mu\text{m}$ 处的峰值响应度为 $1.818 \text{ A}/\text{W}$, 零偏置微分电阻面积为 $0.053 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 比探测率为 $3.26 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

关键词:红外探测器;高温工作;暗电流;光响应度;比探测率

中图分类号:TN214 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.09.018

Characteristic analysis of $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ infrared detectors at high temperature

DU Peng-fei, YE Wei

(School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: The performance of uncooled heat detectors still needs to be improved in spectral inspection applications. In order to reduce the thermal noise and dark current and realize the high temperature performance of the device, the multiplier layer and the absorption layer are designed separately, and $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$ is used as the multiplication layer material, the effects of different temperature on the dark current and light responsivity of the device are investigated in detail by using the simulation software Silvaco-TCAD. The results show that in the range of high temperature 160~300 K, the dark current of the device increases with the increase of temperature, and the light responsivity shows a change of increasing and then decreasing. Using the equation, it is further calculated that the device has a dark current density of $0.485 \text{ A}/\text{cm}^2$ at -500 mV and 300 K, a peak responsivity of $1.818 \text{ A}/\text{W}$ at $1.5 \mu\text{m}$, a zero-bias differential resistance area of $0.053 \Omega \cdot \text{cm}^2$, and a specific detectivity of $3.26 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$.

Keywords: infrared detector; high operating temperature; dark current; responsivity spectrum; specific detectivity

1 引 言

目前,基于 InSb 和 HgCdTe 的红外检测系统在

非常低的温度下工作时,需要辅助在低温杜瓦瓶^[1]内以缓解热效应。但随着对探测器系统的尺寸、重

基金项目:陕西省教育厅专项科学研究计划项目(No. 17JK0144; No. 18JK0151);陕西理工大学人才启动项目(No. SLGQD2017-19)资助。

作者简介:杜鹏飞(1996-),男,主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: pengfeid@qq.com

通讯作者:叶 伟(1977-),男,博士,副教授,主要从事功能材料与器件,储能材料与器件,传感器方面的研究。E-mail: yewei518@163.com

收稿日期:2021-10-28; **修订日期:**2021-11-26

量等要求不断地提高,为了减轻冷却系统的负担,可以通过处理高温下器件的热噪声,抑制暗电流随温度的升高而增加,从而提高红外成像仪的工作温度。 InGaAs 材料作为 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 短波红((SWI))探测器的主要选择材料,其探测器的低温冷却一直是热敏红外系统的负担。在过去的几十年里,随着探测器技术的快速发展,研究人员开发出了不需要低温冷却的红外成像系统后,红外成像仪在性能和制造成本方面取得了巨大的进步。为了实现能够在高温条件下工作,特别是对处于短波红外范围内窄带隙红外探测器而言,面临的挑战是如何处理通过 Shockley-Read-Hall(SRH)、辐射和俄歇复合,所引起的少数载流子衰变而导致的高温热噪声增加^[2-3]。因此,为了降低器件的热噪声,抑制高温下吸收层的俄歇复合,就需要增加少数载流子的寿命,这是实现目标的关键方法之一。少数载流子的寿命^[4]从根本上决定了红外探测器关于高温工作时的暗电流和外量子效率的高低。在器件方面,高温工作的红外成像仪要求更好的光子收集以提高光的信号。利用宽带隙半导体作为载流子阻挡层,对于抑制产生复合电流和表面漏电流非常重要,可以为少数载流子形成零带偏移,有利于收集光子产生少数载流子,从而获得较高的效率^[5]。因此,将载流子阻挡层所表现出的特点用于器件的倍增层,即采用宽带隙半导体来作为倍增层材料来降低暗电流,以改善器件的高温工作特性。倍增层 InP 和吸收层 InGaAs 组成的 InP/InGaAs 探测器,在波长 1310 nm 或 1550 nm 的光通信系统中已经表现出良好的工作性能^[6-7]。然而,III-V 材料中的三元化合物 $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$ 比 InP 更具有作为倍增层材料的优势,主要原因是 InAlAs 材料的电子/空穴电离系数^[8]、电子迁移率^[9]比 InP 材料的大;与 InP/InGaAs 探测器相比较, $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 探测器的电离系数对温度变化的敏感性大^[10]。因此, $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 探测器在热噪声、增益带宽、响应时间和温度变化等方面获得了更好的工作性能。故 $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 探测器比 InP/InGaAs 探测器更有利于在高温条件下工作,目前还没有关于对 $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 探测器在高温工作下的报道。

本文采用仿真模拟法对平面型 $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 探测器进行仿真分析,探究了不同温

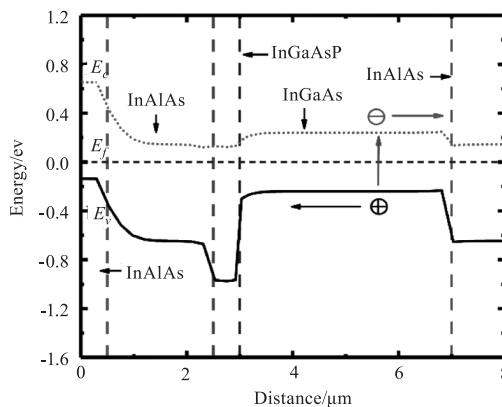
度对器件暗电流和光响应度的影响规律,分析器件外量子效率大于 1 的原因,并利用仿真结果计算出器件在高温工作下的比探测率,为新型红外探测器在高温工作下的进一步发展提供指导。

2 器件结构与仿真模型

图 1 是器件结构和能带结构示意图。在探测器材料体系中,III-V 材料(InGaAs)的金属有机气相外延技术依赖于结构完整性的半导体衬底,可以生产出高性能器件。因此,该探测器以重掺杂 N 型 GaAs 为器件衬底,在其上生长 N 型 $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$ 缓冲层,接着是掺杂 P 型 $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 吸收层,为了减少吸收层和倍增层在异质结界面上积累的少数载流子,引入四元化合物 InGaAsP 渐变层,最后是 N 型掺杂的倍增层和 P 型掺杂的帽层,如图 1(a)所示。

P ⁺ InAlAs Top Contact 0.5 μm	$4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
N ⁺ InAlAs Multiplication layer 2.0 μm	$2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
N ⁺ InGaAsP Grading layer 0.5 μm	$6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
P InGaAs Absorption layer 4.0 μm	$1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
N ⁺ InAlAs Buffer layer 1.0 μm	$1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
n-type GaAs Substrate 5.0 μm	$1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

(a) 器件结构示意图



(b) 器件能带结构示意图

图 1 红外探测器的结构示意图和能带结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of infrared detector and Schematic diagram of band structure

传统 PIN 结构由于过大的耗尽层宽度将导致光生载流子漂移时间延长,使器件的响应速度减弱。相比于 PIN 结构,该结构将吸收层和倍增层分离设计后,光子的吸收和碰撞电离过程相互独立,就可以

分别对器件进行光电性能的优化,提升响应速度。此外,这种结构可以有效抑制窄带隙吸收层隧穿的发生。图1(b)是器件相对应的能带结构示意图,其中 E_c 、 E_v 和 E_f 是能带结构参数,分别表示导带、价带和准费米能级。

采用半导体仿真软件 TCAD 中的 Atlas 进行仿真,Atlas 是基于物理的二维或三维器件模拟器,模拟的基础是泊松方程和连续性方程,可以模拟出半导体器件在高温条件下的电学和光学特性。其中,器件在高温下工作需要充分考虑温度依赖于迁移率(1)、载流子漂移-扩散(2)、SRH(3)^[11]和俄歇复合(4)模型,同时,遵循光学复合模型和碰撞离子化模型,统计分布采用费米-狄拉克统计,计算方法为 Newton 迭代法。为了后续计算方便,在进行器件的暗电流 $I(A)$ 特性仿真后,将其 $I(A)$ 转换为暗电流密度 $J(A/cm^2)$,即 $J-V$ 曲线图。以下是(1)、(2)、(3)和(4)主要物理模型的数学表达式:

$$\begin{cases} \mu_n = \text{mun} \left(\frac{T_L}{300} \right) - \text{tmun} \\ \mu_p = \text{mup} \left(\frac{T_L}{300} \right) - \text{tmup} \end{cases} \quad (1)$$

其中, T_L 是晶格温度; $u_{n,p}$ 为电子和空穴的迁移率; mun 、 mup 、 tmun 和 tmup 分别为迁移率参数。

$$\begin{cases} \vec{J}_n = qnu_n \vec{E}_n + qD_n \nabla_n \\ \vec{J}_p = qpup_p \vec{E}_p + qD_p \nabla_p \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\vec{J}_{n,p}$ 为电流密度; q 为电子电荷量; n 与 p 为电子和空穴浓度; $\vec{E}_{n,p}$ 为有效电场; $D_{n,p}$ 为扩散常数; $\nabla_{n,p}$ 为电子和空穴的梯度。

$$R_{\text{SRH}} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_p \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_{\text{trap}}}{k T_L}\right) \right] + \tau_n \left[p + n_{ie} \exp\left(\frac{-E_{\text{trap}}}{k T_L}\right) \right]} \quad (3)$$

其中, E_{trap} 为陷阱能级与本征费米能级之差; $\tau_{n,p}$ 是电子和空穴的寿命; n_{ie} 是本征载流子浓度。

$$R_{\text{Auger}} = C_n(pn^2 - nn_{ie}^2) + C_p(np^2 - pn_{ie}^2) \quad (4)$$

其中, C_n 和 C_p 俄歇复合系数。

仿真中用到的部分材料参数如表1所示。

3 结果与讨论

图2是红外探测器在不同温度下的暗电流密度与施加偏置电压特性曲线图。图2表明,在施加偏压 $-0.8 \sim +0.4 \text{ V}$ 范围之间,温度从160 K增加到300 K时,随着温度的升高,器件的暗电流密度在逐

渐增大。在 -500 mV 的偏压下,160 K时的暗电流密度为 $6.05 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$,300 K时的暗电流密度为 0.485 A/cm^2 。通过理论公式(5)计算,在高温160~300 K范围内,器件在160 K时的活化能为467 meV。结果表明,在温度160 K时,这与器件从光响应光谱吸收边估算出的有源区带隙(480 meV)相接近,这说明在温度160 K以上时,器件的暗电流主要是由扩散原因所引起的。

表1 仿真模型中的材料参数

Tab. 1 Material parameters in the simulation model

仿真参数	In _{0.83} Ga _{0.17} As	In _{0.83} Al _{0.17} As
带隙/eV	0.48	0.79
电子亲和势/eV	4.47	4.61
电子SRH寿命/s	1×10^{-10}	4×10^{-13}
空穴SRH寿命/s	1×10^{-10}	4×10^{-13}
电子迁移率/($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1448	2500
空穴迁移率/($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	269	233
电子俄歇系数/($\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$)	7×10^{-29}	7×10^{-29}
空穴俄歇系数/($\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$)	7×10^{-29}	7×10^{-29}
导带有效状态密度/ cm^{-3}	1.26×10^{17}	2.61×10^{17}
价带有效状态密度/ cm^{-3}	1.1×10^{19}	7.63×10^{18}
介电常数	14.63	13.96

$$J_{\text{Diff}} = T^3 e^{\frac{-E_a}{kT}} \quad (5)$$

其中, J_{Diff} 是暗电流密度; E_a 是活化能; T 是温度; k 是玻尔兹曼常数。

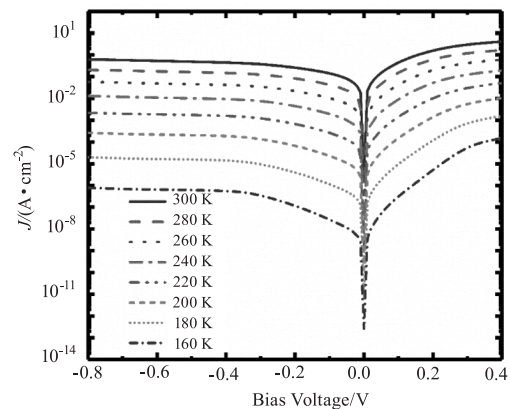


图2 器件在不同温度下的暗电流密度与施加偏置电压特性

Fig. 2 Dark current density vs applied bias voltage characteristic of the device at different temperatures

图3是器件在不同温度下的微分电阻面积 $R_d A$ 与施加偏置电压特性曲线图。利用理论公式(6)计算出器件的微分电阻面积 $R_d A$ 的值,如图3(a)所示。为了清晰表达出不同温度下的微分电阻面积

R_dA 值,绘制出零偏置电压下的微分电阻面积 R_0A 的值,如图 3(b) 所示,其中,图 3(b) 中的嵌入图为各温度 (160 ~ 300 K) 对应的饱和暗电流密度 J_0 。在图 3(a) 中可以看到,在温度升高的同时,器件的微分电阻面积 R_dA 的值在减小,表明高温工作下器件的性能在逐渐变差。在 -500 mV 偏置电压下,计算出器件在 160 K 时的微分电阻面积 R_dA 是 $2.26 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$,在 300 K 时的微分电阻面积是 $0.053 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。结果表明,温度的变化可以显著影响到器件的工作性能。

$$R_dA = \frac{KT/q}{J} \quad (6)$$

其中, J 为暗电流密度; q 是单位电荷量。

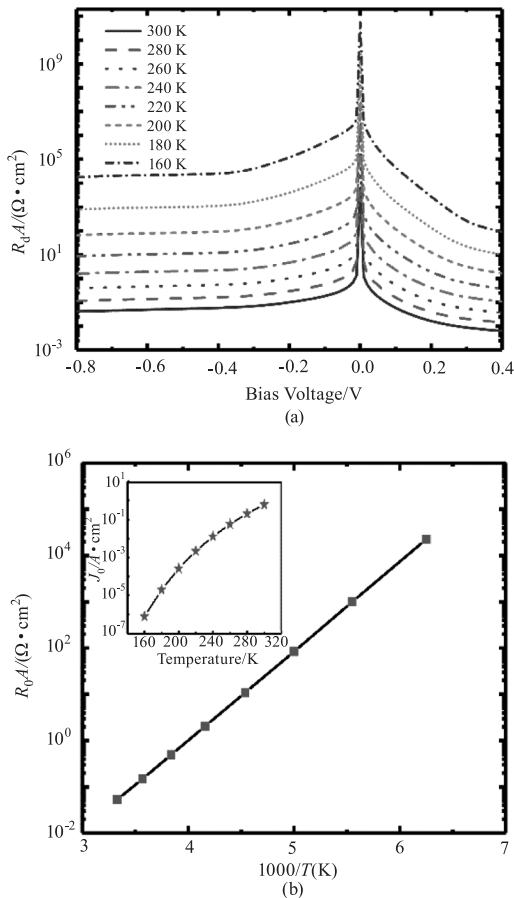


图3 器件在不同温度下的微分电阻面积(R_dA)与施加偏置电压特性

Fig.3 Differential resistance area vs applied bias voltage characteristic of the device at different temperatures

图 4 是器件在不同温度下的光谱响应曲线图。在光电流模拟过程中,采用光强为 $0.1 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的正射单色红外辐射,且施加负偏压为 500 mV 进行光学仿真,其光谱响应曲线模拟结果如图 4(a) 所示。在波长 $1.5 \mu\text{m}$ 处,取不同温度

的 $1000/T$ 为横坐标,绘制出器件在不同温度下的光谱响应变化趋势图,如图 4(b) 所示。在温度 320 K 时,器件的光响应度峰值为 $1.746 \text{ A}/\text{W}$,300 K 时的光响应度峰值为 $1.818 \text{ A}/\text{W}$,当温度继续降低到 280 K 时,光响应度峰值增加到 $1.895 \text{ A}/\text{W}$,而在温度降低到 260 K 时,器件的光响应度峰值减小到 $1.588 \text{ A}/\text{W}$,160 K 时的光响应度峰值为 $0.008 \text{ A}/\text{W}$ 。结果表明,在器件高温 160 ~ 320 K 的工作范围内,其光响应度随着温度的降低呈现先增大后减小的变化趋势。在 $\text{Au}-\text{n}^+\text{GaAs}$ 肖特基二极管^[12]、 ZnS 或 ZnSTe 紫外光电二极管^[13] 中,可以看到器件的光响应度和不同温度之间的变化关系,与图 4(a) 曲线的变化相似。导致这种情况的根本原因是,器件在高温条件下会引起少数载流子的扩散长度增加或态密度分布的变化。然而关于 InGaAs 器件光响应度的负温度系数报道却较少,这种负温度系数相关性与器件倍增层的倍增因子^[14] M 有关。倍增本质上是载流子碰撞电离过程,此过程与载流子的能量密切相关。当施加固定的反向偏压时,随着温度的升高,载流子浓度随温度的变化较小,倍增层的载流子受到声子散射的增加,从而降低碰撞电离系数和倍增电流。因此,光谱响应呈现负温度系数。另外,利用理论公式(7)计算了器件在 300 K,280 K,240 K 和 160 K 时的外量子效率,分别是 150 %,156 %,74 % 和 3.8 %。结果表明,随着温度的降低,器件的外量子效率也相应的先增大后减小。值得注意的是,在高温 300 K 时,器件的外量子效率大于 1,如此高的外量子效率是由于倍增层 InAlAs 中载流子的倍增效应引起,当器件倍增层内的电场强度足够高时,漂移进入其中的载流子与材料的晶格原子发生撞击而产生电子-空穴对,新生的载流子继续碰撞产生新的电子-空穴对。因此,一个光子就会产生多个载流子而达到倍增效应,就会出现外量子效率大于 1 的情况。

$$\eta = \frac{N_c}{N_l} = \frac{hc}{e\lambda} R \quad (7)$$

其中, η 是外量子效率; N_c 是载流子数量; N_l 是光子数量; h 是普朗克常量; c 是光速; e 是单位电荷量; λ 是入射光的波长; R 是光响应度。

图 5 是器件在不同温度下的比探测率曲线图。在进行电学和光学表征后,利用理论公式(8)计算出器件在不同温度下的比探测率。在器件施加负偏

压 500 mV 和波长 1.5 μm 处对应的峰值响应度下, 计算出器件在温度 160 K 时的比探测率为 $1.28 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 在 300 K 时的比探测率为 $3.26 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 从图 5 中可以看到, 随着温度的升高, 器件的比探测率降低, 表明工作性能在逐渐变差, 这是因为由扩散、生成复合、碰撞电离和带间隧穿引起探测器产生的电流的过程, 依赖于温度的变化, 当温度升高时, 载流子的俘获系数就会变大, 导致载流子寿命减小, 因此, 产生的电流就会逐渐增大, 导致器件的比探测率下降。

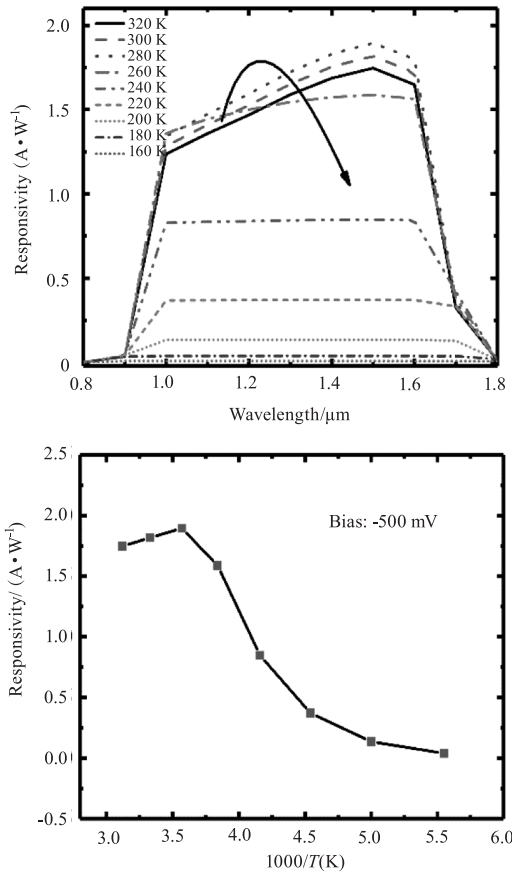


图4 器件在不同温度下的光谱响应曲线

Fig. 4 Responsivity spectrum curves of devices at different temperatures

$$D^* = R \sqrt{\frac{R_0 A}{4KT}} \quad (8)$$

其中, D^* 是比探测率; $R_0 A$ 是零偏置微分电阻面积; R 为光响应度。

通过查阅最近相关报道文献^[15-17]可知, 器件在高温 (160 ~ 300 K) 工作条件下的比探测率集中分布在 $10^9 \sim 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 之间。图 6 为不同结构的器件在 300 K 时的比探测率对比图, 其中, 器件 3 为本文计算出的比探测率值, 器件 1、2、

4 和 5 为报道的比探测率值。结果表明, 器件 3 的比探测率值处于报道器件比探测率值的范围之内, 且明显高于器件 1 和 2, 说明该 $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 探测器可在高温下进行工作, 具有良好的工作性能。

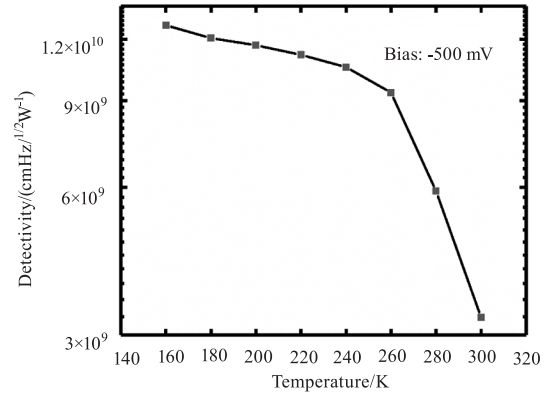


图5 器件在不同温度下的比探测率

Fig. 5 Specific detectivity of the device at different temperatures

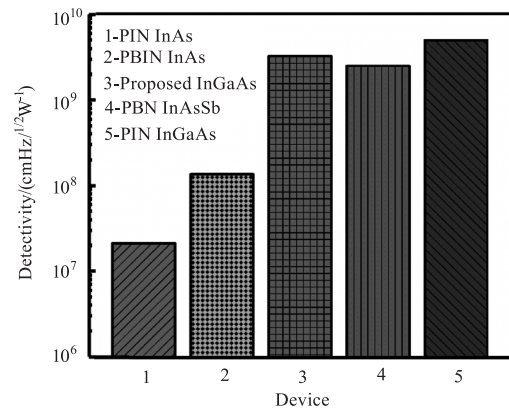


图6 与最近报道器件的比探测率比较图

Fig. 6 Comparison diagram of specific detectivity with recently reported devices

4 结 论

本文利用半导体仿真工具 Silvaco-TCAD 软件对 $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 红外探测器进行仿真, 模拟计算了该器件在高温工作条件下的电流特性和光响应度的变化规律。详细讨论了器件在不同温度 160 ~ 300 K 范围内, 随着温度的升高, 器件的暗电流依次增大, 光响应度呈现出先增大后减小的变化趋势, 进一步计算了在高温工作条件下表征器件性能参数的大小。结果表明, 器件的微分电阻面积 $R_d A$ 和比探测率 D^* 随着温度的升高均呈下降趋势。此研究结果对未来制备具有高性能的短波红外探测器在高温工作条件下具有指导意义。

参考文献:

- [1] Fan Bowen, Zhang Yi, Wang Guan, et al. Cooling performance optimization of refrigeration infrared detector components[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(3): 310–314. (in Chinese)
- 范博文, 张懿, 王冠, 孟令伟. 制冷型红外探测器组件降温性能优化[J]. *激光与红外*, 2020, 50(3): 310–314.
- [2] Martyniuk P, Rogalski A. HOT infrared photodetectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, 21(2): 239–257.
- [3] Reibel Y, Taalat R, Brunner A, et al. Infrared SWAP detectors: pushing the limits[C]//*Infrared Technology and Applications XLI*. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9451: 945110.
- [4] Chen Huiqing, Shi Chunwei, Hu Shangzheng, et al. Study on p-on-n technology of the MWIR HgCdTe for hot work[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 435–438. (in Chinese)
- 陈慧卿, 史春伟, 胡尚正, 等. 中波碲镉汞 p-on-n 高温工作技术研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(4): 435–438.
- [5] Klipstein P. "XBn" barrier photodetectors for high sensitivity and high operating temperature infrared sensors[C]//*Infrared Technology and Applications XXXIV*. International Society for Optics and Photonics, 2008, 6940: 69402U.
- [6] Zhao Y, Zhang D, Qin L, et al. InGaAs-InP avalanche photodiodes with dark current limited by generation-recombination[J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8546–8556.
- [7] Ribordy G, Gisin N, Guinnard O, et al. Photon counting at telecom wavelengths with commercial InGaAs/InP avalanche photodiodes: current performance[J]. *Journal of Modern Optics*, 2004, 51(9–10): 1381–1398.
- [8] Yu Y J, Bosman G, Bhattacharya P K. Impact ionization coefficient ratio in InGaAs/InAlAs superlattice avalanche photodiodes determined from noise measurements[J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51(18): 1433–1435.
- [9] Takanashi Y, Takahata K, Muramoto Y. Characteristics of InAlAs/InGaAs high-electron-mobility transistors under illumination with modulated light[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, 46(12): 2271–2277.
- [10] Yuan Y, Zheng J, Tan Y, et al. Temperature dependence of the ionization coefficients of InAlAs and AlGaAs digital alloys[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(8): 794–799.
- [11] Alchaar R, Rodriguez J B, Höglund L, et al. Characterization of an InAs/GaSb type-II superlattice barrier photodetector operating in the LWIR domain[J]. *AIP Advances*, 2019, 9(5): 055012.
- [12] Tansley T L. Temperature dependence of hole diffusion length from spectral response of Au-n^+ GaAs photodiodes[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1972, 5(6): 1146.
- [13] Sou I K, Ma Z H, Zhang Z Q, et al. Temperature dependence of the responsivity of II-VI ultraviolet photodiodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(9): 1098–1100.
- [14] Ma Y, Zhang Y, Gu Y, et al. Tailoring the performances of low operating voltage InAlAs/InGaAs avalanche photodetectors[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19278–19287.
- [15] Wu D, Li J, Dehzangi A, et al. Mid-wavelength infrared high operating temperature pBn photodetectors based on type-II InAs/InAsSb superlattice[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(2): 025018.
- [16] Dwivedi A D D, Mittal A, Agrawal A, et al. Analytical modeling and ATLAS simulation of $\text{N}^+ \text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{p}^+ \text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ pin photodetector for optical fiber communication[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53(4): 236–245.
- [17] Czuba K, Ciura L, Sankowska I, et al. The role of noise in specific detectivity of InAs/GaSb superlattice MWIR Barodiodes[J]. *Sensors*, 2021, 21(21): 7005.