

文章编号: 1000-7032(2018)08-1143-08

GaSb/InSb/InP 异质结构的漏电流机制

徐佳新, 徐德前, 庄仕伟, 李国兴, 张源涛, 董 鑫, 吴国光, 张宝林*

(吉林大学电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 为提高 InSb 红外探测器室温下的工作性能, 设计了 GaSb/InSb/InP 异质结构, 并对结构中俄歇复合与肖克莱-瑞德复合两种复合机制对漏电流的影响进行研究。利用 TCAD 仿真工具对 InSb 探测器件进行建模, 分析得到能带结构与载流子分布。以能带参数为基础, 根据连续性方程, 结合漂移扩散模型, 分析了俄歇复合在反偏压下的衰减效应, 并综合肖克莱-瑞德复合的影响, 计算出不同缺陷浓度下器件的漏电流。利用低压金属有机化学气相沉积(LP-MOCVD)技术制备 GaSb/InSb/InP 异质外延样品, 对其漏电流进行测试, 并与仿真结果进行对比分析。实验结果表明, 计算结果与实验结果一致, 器件工作性能的主要限制为肖克莱-瑞德复合机制, 器件的漏电流为 $0.26 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 品质因子 R_0A 为 $0.1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。相比于同质 InSb 结构, 器件的 R_0A 提高了一个数量级, 已接近实用化水平。

关键词: InSb; 红外探测器; 非制冷; 复合机制; 漏电流

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183908.1143

Leakage Current Mechanism of GaSb/InSb/InP Heterostructure

XU Jia-xin, XU De-qian, ZHUANG Shi-wei, LI Guo-xing,

ZHANG Yuan-tao, DONG Xin, WU Guo-guang, ZHANG Bao-lin*

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

* Corresponding Author, E-mail: zbl@jlu.edu.cn

Abstract: In order to improve the performance of InSb infrared photo detectors operating at room temperature, a hetero-junction structure of GaSb/InSb/InP was proposed, and the contribution of Auger mechanism and Shockley-Read-Hall (SRH) mechanism to the leakage current was investigated. A theoretical model was established using TCAD tools, to obtain the band structure and carrier distribution. Then a simulation of the suppression of Auger mechanism under reverse bias and the total leakage current including Shockley-Read mechanism with different impurity concentrations was proceeded. The simulation was based on the carrier continuity equations, combined with the drift-diffusion transport model. Finally, samples were prepared using LP-MOCVD technique and a test of leakage current was carried out, and an analysis of the theoretical model and experiment data was presented. Experimental results indicate that the main limitation of the devices' performance is SRH mechanism, and there is a well fit of the theoretical model with the experiment data. The leakage current of the sample is $0.26 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, and R_0A is $0.1 \Omega \cdot \text{cm}^2$. R_0A of the device increases by an order of magnitude compared to the homo-junction structure, and the device is close to practical level.

Key words: InSb; infrared detector; un-cooled; recombination mechanism; leakage current

收稿日期: 2018-01-02; 修订日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(61574069)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61574069)

1 引 言

目前,在气体监测、遥感技术、红外通讯等诸多领域,对 3~5 μm 波段的半导体红外探测器均有着迫切的需求。InSb 材料作为一种典型的窄禁带半导体材料,具有量子效率高、响应速度快、稳定性好的优点,但是其在室温条件下的高复合噪声制约了器件的探测性能,难以满足第三代红外探测器的发展要求^[1-2]。近年来,以微机电技术(MEMS)为基础的微测辐射热计^[3]与碲化物 II 型超晶格结构^[4],由于工作温度高、覆盖波段范围广等特点而成为近年来的研究热点,但是微测辐射热计的响应速度较低,而超晶格结构则需要 在器件表面制备复杂的光栅结构以提高量子效率,InSb 光伏型器件则不具备这样的缺点,因此仍具有一定的竞争力。

为了提高探测器的工作温度,人们从器件的结构设计入手,提出 MSM 结构、nBn 结构以及非平衡探测器等^[5-12],以解决窄带隙材料复合率高的问题。其中,非平衡探测器结构被证明是一种降低俄歇复合噪声的有效手段^[11,13],器件的 R_0A 可以达到 $1.5 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。但是,这种非平衡探测器采用 InSb 同质结构,俄歇复合效应在有源区以外并未被抑制,复合率依然很高。而且 N^+ 区与 P^+ 区内高浓度的杂质,在 InSb 中将会引发严重的肖克莱-瑞德复合过程,使得漏电流很大。

为此,本文提出采用 GaSb 与 InP 两种宽禁带材料分别作为器件的 P^+ 区与 N^+ 区,制备一种 GaSb/InSb/InP 异质 PIN 结构,利用 TCAD 工具对器件进行建模及仿真,并采用低压金属有机化合物(LP-MOCVD)技术制备样品,研究其反向漏电流及品质因子。测试结果表明,理论模型与实验结果相吻合,器件品质因子 R_0A 相比于同质 InSb 结构提高了一个数量级,达到了 $0.1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。由于 InSb 有源区内的复合机制是限制器件工作性能的主要因素,因此对有源区内的复合机制进行研究,对降低器件的漏电流具有指导性意义,同样对提高器件的工作温度有着重要的意义。

2 器件仿真模型

2.1 InSb 能带

由于 GaSb 和 InP 两种材料与 InSb 同属 III/V 族半导体,在能带结构方面具有一定的相似

性^[14],因此以 InSb 为例说明能带参数的计算方法。InSb 是一种直接带隙材料,其能带结构如图 1 所示。

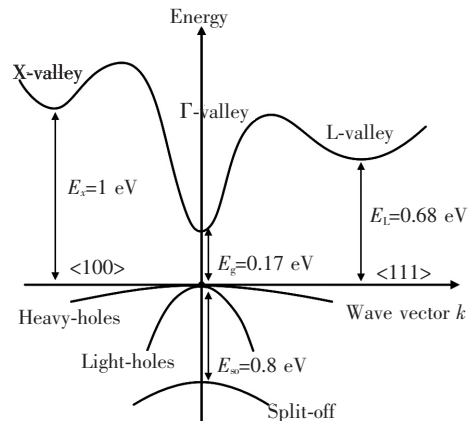


图 1 InSb 能带结构图

Fig. 1 Band structure of InSb

对于 InSb 的 Γ 能谷,由于其曲率很大,需要在抛物线模型的基础上添加一个修正系数 α ^[15],以提高拟合精度,此时状态密度可写为

$$g(E) = \frac{\sqrt{2}}{\hbar^2 \pi^2} \sqrt{E} m_e^{\frac{3}{2}} \sqrt{1 + \alpha E} (1 + 2\alpha E), \quad (1)$$

并且,在室温附近,由于本征费米能级接近导带底,即使未掺杂的 InSb 材料也会呈现出简并半导体的特性。本征费米能级与导带底的距离可以通过下式来估算

$$E_i - E_c = \frac{E_v - E_c}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_h}{m_e} \right), \quad (2)$$

可以计算得出,300 K 下 InSb 材料的本征费米能级位于导带底以下 0.02 eV 的位置^[16],处于弱简并区。此时玻尔兹曼近似不再成立,因此必须采用费米-狄拉克分布来计算导带中的电子浓度。利用热平衡时的电子浓度公式

$$n_0 = \int g(E) f(E) dE, \quad (3)$$

将费米分布函数 $f(E)$ 进行泰勒展开并忽略高阶项可以得到

$$n_0 = N_c \left\{ F_{1/2}(\eta) + \frac{15\alpha}{4} F_{3/2}(\eta) + \frac{105\alpha^2 (kT)^2}{32} F_{5/2}(\eta) \right\}, \quad (4)$$

其中 $N_c = 2 (m_e kT / 2\pi \hbar^2)^{3/2}$ 是 InSb 导带的有效状态密度, $F_{1/2}$ 、 $F_{3/2}$ 、 $F_{5/2}$ 分别为 1/2、3/2、5/2 阶费米积分。

对于价带, 抛物线近似依然成立, 同时由于费米能级距价带顶较远, 满足玻尔兹曼近似的 $3kT$ 条件, 因此价带中空穴的浓度 p_0 可由下式计算

$$p_0 = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right), \quad (5)$$

值得说明的是, 在 InSb 材料中, Γ 能谷中心附近重空穴带的曲率远小于导带, 因此在计算俄歇复合系数的过程中, 可以对重空穴带进行“平带”近似, 从而简化计算过程^[17]。

2.2 InSb 有源区的俄歇复合模型

俄歇复合是一种非辐射复合过程, 是影响器件性能的一种重要机制^[18]。根据参与俄歇复合的载流子在能带中的分布情况, 俄歇复合及对应的碰撞电离过程可以分为 10 种类型, 其中在 InSb 材料中起主要作用的是 CCCH 与 CHHL 这两种过程^[13]。

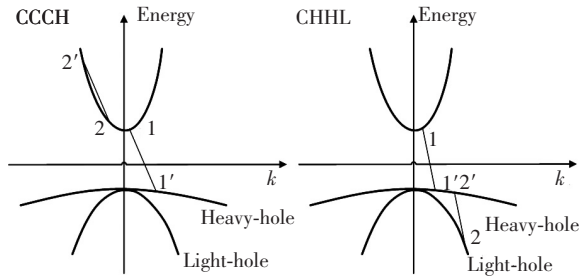


图 2 CCCH 及 CHHL 俄歇机制示意图

Fig. 2 Schematic representation of CCCH and CHHL Auger processes

在 CCCH 复合过程中, 发生复合的电子和空穴分别位于导带底与重空穴带上, 获得能量的电子在导带中被激发到更高的能级。该过程的复合率 R_n 与载流子浓度的关系为

$$R_n = R_{n0} \frac{np - n_i^2}{n_i^2} \frac{n}{n_0}, \quad (6)$$

其中, R_{n0} 为热平衡条件下的复合率。

与 CCCH 过程类似, CHHL 过程中的电子和空穴同样位于导带底与重空穴带, 但获得能量的电子从轻空穴带被激发到重空穴带。CHHL 过程的复合率 R_p 为

$$R_p = R_{p0} \frac{np - n_i^2}{n_i^2} \frac{p}{p_0}, \quad (7)$$

因此, 总的净复合率 R_{Auger} 为上述两种机制复合率的和, 即

$$R_{\text{Auger}} = R_n + R_p = \frac{R_{n0}np_0 + R_{p0}pn_0}{n_i^4} (np - n_i^2) = (C_n n + C_p p) (np - n_i^2), \quad (8)$$

其中, C_n 与 C_p 分别称为 CCCH 过程与 CCHL 过程的俄歇复合系数。量子力学计算结果表明, C_n 与 C_p 的值与温度及禁带宽度有关, 计算过程中综合考虑了理论计算^[17] 与实验测量^[18] 的结果来确定二者的大小。在 $np \ll n_i^2$ 的条件下, 俄歇复合率可近似地写为

$$R_{\text{Auger}} = - (C_n n + C_p p) n_i^2, \quad (9)$$

此时净复合率为负值, 代表着产生率。因此, 在载流子浓度较低时, 俄歇复合的净产生率与载流子浓度成正比, GaSb/InSb/InP 结构正是利用这一原理来达到抑制俄歇复合的目的。

2.3 InSb 有源区的肖克莱-瑞德复合模型

肖克莱-瑞德复合是另一种重要的复合机制, 是低温条件下限制探测器性能的重要因素。在室温下, 当俄歇复合受到抑制, 或材料的杂质和缺陷的浓度很高时, 肖克莱-瑞德复合可能成为决定器件漏电流的主要因素。由于窄带隙材料的禁带宽度较小, 即便是浅能级杂质也能够呈现出明显的复合中心效应, 对载流子的寿命影响很大。

肖克莱-瑞德复合过程的净复合率^[19] 可以表示为

$$R_{\text{SRH}} = (np - n_i^2) / \{ \tau_p [n + n_i \exp(E_t/kT)] + \tau_n [p + n_i \exp(-E_t/kT)] \}, \quad (10)$$

其中 E_t 为复合中心能级, τ_n 、 τ_p 类似于少数寿命, 分别反映了复合中心对电子与空穴的最大俘获能力, 其与复合中心浓度的关系分别为

$$\tau_n = \frac{1}{c_n N_t}, \quad \tau_p = \frac{1}{c_p N_t},$$

其中 N_t 为复合中心的浓度, c_n 与 c_p 分别称为电子与空穴的俘获系数。由于制备工艺与具体材料生长环境的不同, 材料中的杂质种类难以确定, 对复合中心的参数 E_t 、 N_t 以及俘获系数 c_n 、 c_p 的确定造成了困扰, 计算中采用了实验测量的结果^[20-21]。

2.4 GaSb/InSb/InP 结构的电荷输运模型

在对 GaSb/InSb/InP 结构的电学特性进行仿真时, 从连续性方程入手, 结合漂移扩散模型进行建模^[22], 并通过 TCAD 工具实现。

连续性方程可写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= \frac{1}{q} \nabla \mathbf{J}_n - R + G, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{1}{q} \nabla \mathbf{J}_p - R + G, \end{aligned} \quad (11)$$

其中, q 为电子电荷量, J_n 、 J_p 分别为电子电流与空穴电流, R 与 G 分别代表复合率与产生率。

在扩散漂移模型下, 电子电流 J_n 与空穴电流 J_p 可以表示为

$$\begin{aligned} J_n &= qn\mu_n E + qD_n \nabla n, \\ J_p &= qp\mu_p E - qD_p \nabla p, \end{aligned} \quad (12)$$

其中, E 为电场强度, μ_n 、 μ_p 分别为电子与空穴的迁移率, D_n 、 D_p 分别为电子与空穴的扩散系数。

在无外界激励的条件下, 产生率 G 为 0。同时可以证明, 直接辐射复合与隧穿效应的影响可以忽略^[13-14]。因此复合率 R 由俄歇复合与肖克莱-瑞德复合两种机制决定, 即

$$R = R_{\text{Auger}} + R_{\text{SRH}}, \quad (13)$$

将式(12)、(13)带入到式(11)中, 便得到完整的电荷输运方程:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \mu_n E \nabla n + n\mu_n \nabla E + D_n \nabla^2 n - (R_{\text{Auger}} + R_{\text{SRH}}),$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= -\mu_p E \nabla p - p\mu_p \nabla E + D_p \nabla^2 p - \\ &\quad (R_{\text{Auger}} + R_{\text{SRH}}). \end{aligned} \quad (14)$$

3 GaSb/InSb/InP 结构

在 GaSb/InSb/InP 结构中, 采用禁带较宽的重掺杂 GaSb 与重掺杂 InP 分别作为 P⁺ 区与 N⁺ 区, 作为空穴传输层与电子传输层。非故意掺杂的 InSb 材料作为有源区, 吸收红外辐射并发射光生载流子。GaSb 较低的电子亲和势使得 GaSb 的价带顶略低于 InSb 的导带底, 位于 InSb 的禁带之间。InP 的电子亲和势与 InSb 相近, 因此 InP 的导带底与 InSb 的导带底基本持平。这使得 GaSb/InSb/InP 结构在热平衡时, 能带呈现出一种类似于图 3(a) 中所示的“阶梯”形态。在这种能带结构下, 电子与空穴在沿“阶梯”而下的方向上可以自由地流动而不受限制, 而在反方向上的运动则受到高势垒的阻碍, 使得扩散效应产生的噪声电流密度很低。

如果 InSb 与 GaSb、InP 间的费米能级差很大, 将导致平衡时 InSb 有源区异质结界面处的能带强烈弯曲。为避免这种情况, GaSb 与 InP 两种材料应分别重掺杂为 P⁺ 型和 N⁺ 型, 以减小与 InSb 费米能级的差异。这将导致 GaSb 与 InP 处于弱简并区, 因此在计算两种材料中的载流子浓度时, 可参考讨论 InSb 材料能带时的式(4)与式(5)。

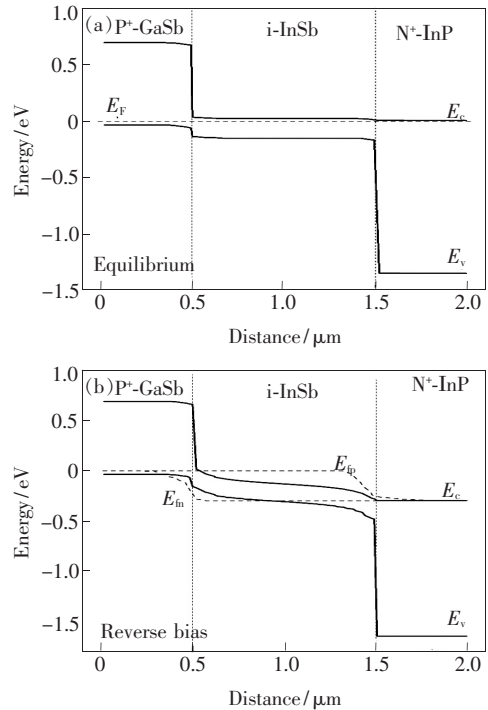


图 3 GaSb/InSb/InP PIN 结构的能带图。(a) 平衡条件下; (b) -0.3 V 反偏压下。

Fig. 3 Band diagram of GaSb/InSb/InP PIN structure under equilibrium (a) and -0.3 V bias (b)

当施加反偏压时, 由于 N⁺ 区与 P⁺ 区内杂质浓度很高, 空间电荷区的扩展很小, 耗尽层基本扩展在 InSb 有源区, 反偏压基本全部被有源区分担, 内建电场被增强。这有利于光生载流子快速分离, 在电场的作用下迅速漂移并穿过有源区, 从而具有较高的响应速度。光生电子与空穴在电场的作用下分别漂移至 N⁺ 区与 P⁺ 区, 并以多子的“身份”继续向两侧扩散, 在小注入条件下不会引起 N⁺ 区与 P⁺ 区内载流子浓度的变化。因此, 光生载流子在 N⁺ 区与 P⁺ 区内复合率很低。计算结果表明, 在不计表面复合的情况下, 超过 95% 的光生载流子可以被两侧的电极收集。

同时, 在一定的反偏压下, 有源区将被完全耗尽, 载流子的浓度很低。根据(9)式, 俄歇复合率与载流子的浓度呈线性关系, 反偏压的增加可降低载流子的浓度, 因而可以抑制俄歇复合过程, 从而达到降低器件噪声的目的。

4 结果与讨论

4.1 载流子分布

反偏压下 GaSb/InSb/InP PIN 结构中电子与

空穴的浓度分布如图 4 所示。在 -0.3 V 的反向偏压下, InSb 有源区几乎完全耗尽, 载流子的浓度相比热平衡时的浓度 $1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 下降了近两个数量级。

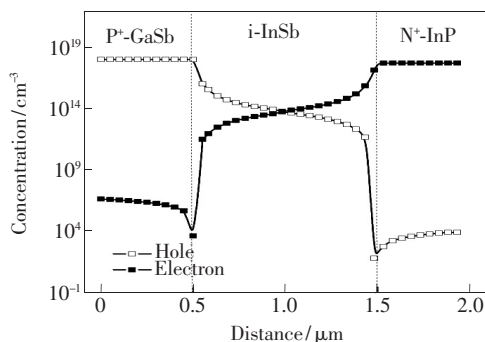


图 4 GaSb/InSb/InP PIN 结构 -0.3 V 反偏压下的载流子分布

Fig. 4 Carrier concentration of GaSb/InSb/InP PIN structure under -0.3 V reverse bias

值得说明的是, 在 N^+ 区与 P^+ 区中少子的浓度很低, 分别为 10^6 cm^{-3} 与 10^4 cm^{-3} 数量级。相比于 InSb 材料, 即使在杂质浓度为 10^{18} cm^{-3} 的重掺杂情况下, 少子浓度依然高达 10^{14} cm^{-3} 量级。因此, 采用 GaSb 与 InP 两种宽禁带材料作为 N^+ 区与 P^+ 区, 可以有效地削弱反偏压下有源区的少子注入效应, 从而降低器件的漏电流。

4.2 GaSb/InSb/InP 结构的俄歇复合电流

在仅考虑俄歇复合时, GaSb/InSb/InP 异质结构在不同工作温度下的漏电流如图 5 所示。在负偏压增加到 -0.2 V 以后, 漏电流逐渐下降。在高温时这种衰减过程十分明显, 温度为 300 K 时漏电流的饱和值相比于极大值有近一个数量级的下降。随着工作温度的降低, 这种衰减效应逐渐减弱。

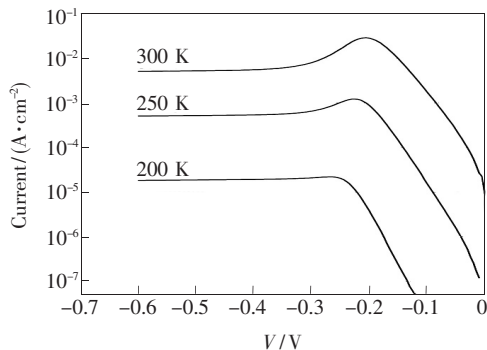


图 5 不同反偏压下 GaSb/InSb/InP PIN 结构的俄歇漏电流

Fig. 5 Auger leakage current of GaSb/InSb/InP PIN structure under various reverse biases

在反偏压从零开始递增时, 反偏压的增加导致空间电荷区逐渐扩展, 有源区内的载流子迅速被耗尽。此时, 式(8)中的 $(np - n_i^2)$ 一项迅速减小, 由于其为载流子浓度的二次方项, 使产生率远大于复合率, 漏电流也随之迅速增加。

当反偏压超过 -0.2 V 以后, 有源区内载流子浓度已经很低, 此时 $(np - n_i^2) \approx n_i^2$, 因此俄歇复合率可由式(9)表示, 由载流子浓度 n 与 p 决定, 并随着反偏压的增加而逐渐下降, 漏电流也随之下降, 呈现出负阻效应。

最后, 有源区被完全耗尽, 此时尽管反向偏压的增加仍然能够将更多的载流子从有源区“抽离”, 但从图 4 可以看出, 在结的附近载流子的浓度仍然很高, 此时俄歇复合过程集中发生在结的附近, 并使漏电流呈现出饱和趋势。

尽管反偏压下有源区内的载流子浓度相比于热平衡时下降了两个数量级, 但是 300 K 下的漏电流仅有一个数量级的下降, 这与式(9)的计算结果相矛盾。这种矛盾的结果, 是结附近高浓度的载流子造成的。通过计算有源区内的平均俄歇复合率:

$$\bar{R}_{\text{Auger}} = \frac{1}{L} \int R_{\text{Auger}}(x) dx, \quad (15)$$

可知, 结附近高浓度的载流子在一定程度上抵消了有源区内部低浓度载流子的作用。

当温度降低时, 俄歇复合系数与载流子浓度均以指数形式下降^[17], 此时俄歇复合率基本只由结附近高浓度的载流子决定, 导致低温时俄歇复合的抑制效果减弱。在温度下降到 200 K 时, 俄歇复合电流的衰减现象已十分微弱。

4.3 GaSb/InSb/InP 结构的反向漏电流

与俄歇复合过程不同, 根据式(10), 肖克莱-瑞德过程的净产生率随载流子浓度的降低而单调增加, 与俄歇复合率的衰减效应相反。因此在反偏压下, 这两种复合机制相互制约, 并共同决定了漏电流的大小。

考虑到肖克莱-瑞德复合的影响, 在 InSb 有源区内的有效复合中心浓度为 1.0×10^{12} , 1.0×10^{13} , $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 三种条件下分别计算 PIN 结的漏电流, 结果如图 6 所示, 虚线为仅考虑俄歇复合的漏电流。

当复合中心浓度在 $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 以下时, 俄歇复合的作用占据着主导地位, 在反偏压超过

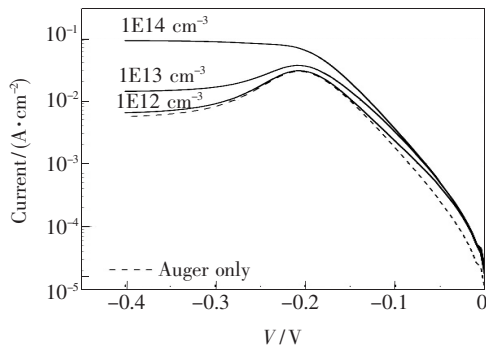


图 6 不同反偏压下 GaSb/InSb/InP PIN 结构的漏电流
Fig. 6 Leakage current of GaSb/InSb/InP PIN structure under various reverse bias

-0.2 V 后,漏电流随着反偏压的增大而逐渐下降并饱和。当复合中心浓度超过 $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 以后,肖克莱-瑞德复合的影响逐渐显现出来,在一定程度上抵消了漏电流的衰减效应,并决定了反向饱和电流的大小。在复合中心浓度达到 10^{14} cm^{-3} 数量级以后,肖克莱-瑞德复合的影响已经完全覆盖了俄歇复合,并直接决定了漏电流的大小。

通过以上分析可知,俄歇复合机制决定了器件漏电流的下限,因此决定了器件在室温下工作性能的极限。同时,杂质与缺陷的浓度对漏电流的影响很大,浓度达到 10^{14} cm^{-3} 数量级时,肖克莱-瑞德复合将成为影响工作性能的主要因素。

4.4 GaSb/InSb/InP 结构的制备与测试

通过 LP-MOCVD 技术,使用三甲基镓(TM-Ga)、三甲基铟(TMIn)、三乙基锑(TEsB)作为反应源,二乙基锌(DEZn)作为 p 型掺杂源,在 InP 衬底上依次生长 i-InSb 外延层与 p^+ -GaSb 外延层,工艺参数见表 1。

表 1 GaSb/InSb/InP PIN 结构的生长参数

Tab. 1 Parameters of the epitaxial growth of GaSb/InSb/InP PIN structure

生长参数	InSb 有源区	P^+ 型 GaSb
厚度/ μm	1.0	0.4
生长温度/ $^{\circ}\text{C}$	450	500
生长时间/min	60	24
TMGa 流量/ $(\text{mol} \cdot \text{min}^{-1})$	0	8.1×10^{-6}
TMIn 流量/ $(\text{mol} \cdot \text{min}^{-1})$	4.5×10^{-6}	0
TEsB 流量/ $(\text{mol} \cdot \text{min}^{-1})$	9.0×10^{-6}	12.1×10^{-6}
DEZn 流量/ $(\text{mol} \cdot \text{min}^{-1})$	0	8.0×10^{-8}
总氢气流量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	3.0	3.0

最后,通过蒸发工艺在外延层表面制备电极。利用 Agilent B2900A 型半导体测试仪,对样品反偏压下的漏电流进行了测试,结果如图 7 所示。

图 7 中虚线为实验测量结果,实线为复合中心浓度为 $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时的仿真结果。由于 InSb 外延层与 InP 衬底的晶格适配较大,达到 10%,导致 InSb 外延层界面处的缺陷浓度高,肖克莱-瑞德复合为器件漏电流的主要影响因素,因此实验中未观察到由于俄歇复合受到抑制所引起的负阻效应。通过漏电流的大小来估计复合中心浓度,近似推算样品 InSb 外延层内的缺陷浓度在 $2 \times 10^{14} \sim 7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 范围内,与报道的结果吻合^[20]。

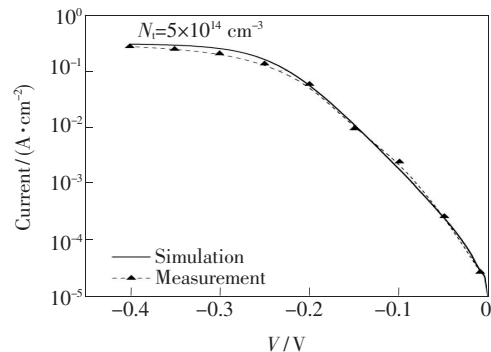


图 7 GaSb/InSb/InP PIN 结构不同反偏压下漏电流测试结果

Fig. 7 Measured data of leakage current of GaSb/InSb/InP PIN structure under various reverse bias

光伏器件的品质因子 R_0A 常被用来评价器件的工作性能及工艺水平,其与器件饱和漏电流 I_{sat} 的关系可表示为

$$R_0A = \frac{kT/qA}{I_{\text{sat}}}, \quad (16)$$

样品的反向饱和漏电流为 $0.26 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,由此计算出样品的 R_0A 值为 $0.1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。研究表明,利用低温生长或缓冲层技术可以有效地降低 InSb 外延层中的缺陷浓度^[23-24],因此通过优化外延层的生长工艺,可以进一步降低器件的漏电流,使器件接近俄歇复合机制所决定的性能极限。根据仿真结果,俄歇复合机制引发的饱和漏电流为 $5.3 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,因此 GaSb/InSb/InP 结构在室温下 R_0A 的极限值为 $4.9 \Omega \cdot \text{cm}^2$,对应的归一化探测率为 $10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{1/2}$ 量级。

5 结 论

为提高室温下 InSb 红外探测器的工作性能,

本文设计了 GaSb/InSb/InP 异质 PIN 结构,利用 TCAD 工具对器件进行建模及仿真,研究了 InSb 有源区内载流子的复合机制对器件漏电流的影响。研究发现,俄歇复合机制引发的噪声在反偏压下呈现出一定的衰减效应,并决定了器件探测性能的极限。当 InSb 有源区内的缺陷浓度高于 1.0×10^{14}

cm^{-3} 后,肖克莱-瑞德复合成为影响漏电流的主要机制。通过 LP-MOCVD 技术制备样品并对其漏电流进行测试分析,实验结果表明,理论模型与实验结果相吻合,样品的漏电流为 $0.26 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,品质因子 R_0A 达到了 $0.1 \Omega \cdot \text{cm}^2$,相比于同质 InSb 结构提高了一个数量级,已接近实用化水平。

参 考 文 献:

- [1] 王国伟, 徐应强, 牛智川. 新型低维结构锑化物红外探测器的研究与挑战 [J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014, 44(4):368-389.
WANG G W, XU Y Q, NIU Z C. Research and challenge of new low dimensional structure antimonide infrared detector [J]. *Scientia Sinica (Physica Mechanica & Astronomica)*, 2014, 44(4):368-389. (in Chinese)
- [2] ROGALSKI A. Material considerations for thirdgeneration infrared photon detectors [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2007, 50(2-3):240-252.
- [3] 冯涛, 金伟其, 司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态 [J]. 红外技术, 2015, 37(3):177-184.
FENG T, JIN Q W, SI J J. Uncooled infrared FPA—a review and forecast [J]. *Infrared Technol.*, 2015, 37(3):177-184. (in Chinese)
- [4] KLIPSTEIN P C, AVNON E, AZULAI D, *et al.*. Type II superlattice technology for LWIR detectors [C]. *Infrared Technology and Applications XL II, International Society for Optics and Photonics, San Francisco, United States*, 2016, 9819:98190T.
- [5] 李彦波, 刘超, 张杨, 等. 锑化物超晶格红外探测器的研究进展 [J]. 固体电子学研究进展, 2010, 30(1):11-17.
LI Y B, LIU C, ZHANG Y, *et al.*. Research progress in Sb-based superlattice infrared detectors [J]. *Res. Prog. SSE*, 2010, 30(1):11-17. (in Chinese)
- [6] ITO M, WADA O. Low dark current GaAs metal-semiconductor-metal (MSM) photodiodes using WSi_x contacts [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, 22(7):1073-1077.
- [7] CHENG Y, IKKU Y, TAKENAKA M, *et al.*. Low-dark-current waveguide InGaAs metal-semiconductor-metal photodetector monolithically integrated with InP grating coupler on III-V CMOS photonics platform [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2016, 55(4S):04EH01.
- [8] MAIMON S, WICKS G W. NBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(15):151109.
- [9] PEREZ J P, EVIRGEN A, ABAUTRET J, *et al.*. MWIR InSb detector with nBn architecture for high operating temperature [C]. *Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XII. International Society for Optics and Photonics, Baltimore, United States*, 2015, 9370:93700N.
- [10] SOIBEL A, TING D Z, HILL C J, *et al.*. Mid-wavelength infrared InAsSb/InSb nBn detector with extended cut-off wavelength [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(10):103505.
- [11] ASHLEY T, ELLIOTT C T, GORDON N T, *et al.*. Room temperature narrow gap semiconductor diodes as sources and detectors in the 5 – 10 μm wavelength region [J]. *J. Cryst. Growth*, 1996, 159(1-4):1100-1103.
- [12] 赵旭, 缪国庆, 张志伟, 等. 新型复合盖层延伸波长 InGaAs 红外探测器结构优化设计 [J]. 发光学报, 2015, 36(1):75-79.
ZHAO X, MIAO G Q, ZHANG Z W, *et al.*. Structure design and optimization of novel composite cap extended wavelength InGaAs infrared detector [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1):75-79. (in Chinese)
- [13] ASHLEY T, ELLIOTT T. Nonequilibrium devices for infra-red detection [J]. *Electron. Lett.*, 1985, 21(10):451-452.
- [14] EHRENREICH H. Band structure and transport properties of some 3 – 5 compounds [J]. *J. Appl. Phys.*, 1961, 32(10):2155-2166.
- [15] SIJERČIĆ E, MUELLER K, PEJČINOVIĆ B. Simulation of InSb devices using drift-diffusion equations [J]. *Solid-state*

- Electron.*, 2005, 49(8):1414-1421.
- [16] MADELUNG O, *Semiconductors: Data Handbook* [M]. 3rd ed. Berlin: Springer Science & Business Media, 2004.
- [17] BEATTIE A R, WHITE A M. An analytic approximation with a wide range of applicability for electron initiated Auger transitions in narrow-gap semiconductors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, 79(2):802-813.
- [18] CHAZAPIS V, BLOM H A, VODOPYANOV K L, *et al.*. Midinfrared picosecond spectroscopy studies of Auger recombination in InSb [J]. *Phys. Rev. B*, 1995, 52(4):2516-2521.
- [19] 孟宪章, 康昌鹤. 半导体物理学 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 1993.
MENG X Z, KANG C H. *Semiconductor Physics* [M]. Changchun: Jilin University Press, 1993. (in Chinese)
- [20] HOLLIS J E L, CHOO S C, HEASELL E L. Recombination centers in InSb [J]. *J. Appl. Phys.*, 1967, 38(4):1626-1636.
- [21] NOTT G J, FINDLAY P C, CROWDER J G, *et al.*. Direct determination of Shockley-Read-Hall trap density in InSb/InAlSb detectors [J]. *J. Phys.: Condensed Matter*, 2000, 12(50):731-734.
- [22] LUNDSTROM M. *Fundamentals of Carrier Transport* [M]. 2nd ed. London: Cambridge University Press, 2002.
- [23] 李占国, 刘国军, 李梅, 等. 缓冲层对 InSb/GaAs 薄膜质量的影响 [J]. 发光学报, 2007, 28(4):546-550.
LI Z G, LIU G J, LI M, *et al.*. Effect of buffer layer on the quality of InSb/GaAs thin films [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2007, 28(4):546-550. (in Chinese)
- [24] 陆大成, 段树坤. 金属有机化合物气相外延基础及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LU D C, DUAN S K. *Fundamentals and Application of Metal Organic Chemical Vapor Deposition* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)



徐佳新(1993 -),男,吉林省吉林市人,硕士研究生,2015年于吉林大学获得学士学位,主要从事 InSb 红外探测器及 MOCVD 生长工艺的研究。

E-mail: xujx15@jlu.edu.cn



张宝林(1964 -),男,吉林通化人,博士,教授,博士生导师,1999年于中国科学院长春物理研究所获得博士学位,主要从事中红外半导体材料及其器件的研究。

E-mail: zbl@jlu.edu.cn