

二极管型非制冷红外焦平面中二极管结构优化研究

瞿帆^{1,3}, 傅剑宇^{1,3,4}, 侯影^{1,3,4}, 卢一泓², 李振锋^{1,4}, 陈大鹏^{1,3,4}

(1.中国科学院微电子研究所 新技术开发部物联网技术研发实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院微电子研究所 集成电路先导研发中心, 北京 100029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 无锡物联网创新中心有限公司, 江苏 无锡 214028)

摘要: 为适应非制冷红外探测器高空间分辨率的发展趋势, 非制冷红外焦平面阵列作为非制冷红外探测器的核心部件不断向大阵列、小像素方向发展。本文针对二极管型非制冷红外焦平面阵列, 理论分析了敏感元件二极管对读出电路以及器件性能的影响, 在确定二极管最佳工作电流的同时, 提炼出二极管结构中串联个数以及结面积为主要性能影响因素。基于此, 设计了 $p^+n-pn-n^+p$ 三合一二极管, 并将其与传统二极管、回型二极管、 p^+n-n^+p 二合一二极管、以及由 p^+n-n^+p 二合一二极管直接拓展得到的两种三合一二极管进行了对比考察, 研究发现 6 种结构中 $p^+n-pn-n^+p$ 三合一二极管在相同尺寸下拥有最多的二极管串联数量且结面积相对最大; 进而利用 Sentaurus TCAD 仿真, 验证了在同一整体尺寸下, $p^+n-pn-n^+p$ 三合一二极管的电压温度系数分别约为 p^+n-n^+p 二合一二极管, 及在其基础上直接拓展得到的两种三合一二极管的 1.5 倍, 为回型二极管与传统二极管的 2.6 倍、3.7 倍。证明了在小像素下 $p^+n-pn-n^+p$ 三合一二极管性能最优, 且在其基础上拓展可得到 N 合一二极管能进一步优化器件的性能。

关键词: 二极管非制冷红外探测器; 噪声等效温差; 电压温度系数; 三合一二极管

中图分类号: TN215

文献标志码: A

文章编号: 1001-8891(2023)03-0308-07

Optimizing Diode Structure in Uncooled Infrared Focal Plane Array

QU Fan^{1,3}, FU Jianyu^{1,3,4}, HOU Ying^{1,3,4}, LU Yihong², LI Zhenfeng^{1,4}, CHEN Dapeng^{1,3,4}

(1. *Internet of Things Technology R&D Laboratory of New Technology Development Department, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;*
2. *Integrated Circuit Advanced Process R&D Center, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;*
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
4. *Wuxi Innovation Center for Internet of Things, Wuxi 214028, China*)

Abstract: To adapt to the development trend of high-spatial-resolution of uncooled infrared detectors, the uncooled infrared focal plane array (IR FPA), which is the core component of uncooled infrared detectors, is constantly developing towards larger arrays and smaller pixels. Aiming at the diode-type IR FPA, this paper theoretically analyzes the influence of the sensitive element diode on the readout circuit and device performance. While determining the best operating current of the diode, the number of series connected in the diode structure and junction area are the leading performance factors. Based on this conclusion, a $p^+n-pn-n^+p$ 3-in-1 diode was designed and combined with traditional diodes, “well”-shape diodes, p^+n-n^+p 2-in-1 diodes, and two 3-in-1 diodes obtained by the direct expansion of p^+n-n^+p 2-in-1 diodes, which were compared and investigated. The study found that the $p^+n-pn-n^+p$ 3-in-1 diodes of the six structures had the most significant number of diodes in series under the same size, and the relative junction area was the largest. Using Sentaurus TCAD simulation, it was verified that under the same overall size, the voltage temperature sensitivity (TCV) value of the $p^+n-pn-n^+p$ 3-in-1 diodes is approximately that of the p^+n-n^+p 2-in-1 diode, and two types diode of 3-in-1 obtained by direct expansion on the p^+n-n^+p 2-in-1 diode was 1.5 times, which is 2.6 times and 3.7

收稿日期: 2022-01-16; 修订日期: 2022-04-11.

作者简介: 瞿帆 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 红外传感器智能化关键技术。E-mail: qufan@ime.ac.cn.

通信作者: 傅剑宇 (1984-), 女, 副研究员, 博士, 致力于 MEMS 红外传感器和热探测器智能化关键技术的研究, 重点进行自检测、自诊断、自补偿和自验证技术的研究。E-mail: fujianyu@ime.ac.cn.

基金项目: 中国科学院科学仪器研发项目 (ZDKYYQ20200007)。

times the “well” shape diode and traditional diode, respectively. It is proved that the performance of the p^+n - pn - n^+p 3-in-1 diode is the best under small pixels, and the expansion of the N-in-1 diode can further optimize the device performance.

Key words: diode uncooled infrared detector, noise equivalent temperature difference, temperature coefficient of voltage, 3-in-1 diode

0 引言

红外辐射是一种在自然界普遍存在的电磁波能量,一切温度高于绝对零度的物体都会产生该辐射。非制冷型红外探测技术是利用红外辐射的热效应重构物体特征的技术^[1]。非制冷红探测器由于无需避免电子热运动的影响,因此可在室温条件下工作,具有质量轻、体积小、功耗小、成本低等特点,现已成为民用及中、低端军用红外探测的首选^[2-3]。

非制冷红外焦平面阵列(infrared focal plane array, IRFPA)是非制冷红外探测器的核心部件,可根据检测机制的不同细分为:热敏电阻型、热释电型、热电堆型、二极管型、场效应管型、光机械型等。其中二极管型 IRFPA 因制造工艺可与互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)工艺兼容,故有利于实现高阵列均匀性与高空间分辨率^[3-4]。

为满足高空间分辨率需求,需具有大阵列和小像素^[5-6]。目前,二极管型 IRFPA 阵列规模已从 320×240 做到 2000×1000 ,像素尺寸从 $40 \mu\text{m}$ 缩小至 $12 \mu\text{m}$ ^[7-9]。随着像素尺寸的不断缩小,二极管作为二极管型 IRFPA 的核心敏感元件,一方面,其电学参数影响着读出电路的设计^[10];另一方面,在性能上直接决定着器件的噪声等效温差(noise equivalent temperature difference, NETD)^[6]。为此,如何在小像素情况下优化二极管成为了研究的焦点。

二极管工作在恒流偏置情况下,其主要电学参数包括:二极管两端正向电压,漏电流与电容。其中,电压温度系数(temperature coefficient of voltage, TCV)是二极管在单位温度改变时的电压变化量。本课题组张强等人发现增加二极管的结面积可以提升二极管的 TCV,由此设计了一种结为回型结构的二极管,通过仿真分析验证了该二极管的 TCV 与灵敏度较传统二极管均有所提升^[11]。三菱公司提出了一种在 SOI 有源区内将 p^+n 与 n^+p 垂直二极管接触在一起的 p^+n - n^+p 二合一二极管结构,使得单个二极管面积显著缩小, $15 \mu\text{m}$ 像素中可串联 12 个二极管,有效地使得小像素仍保持大的 TCV^[12]。已有研究为优化小像素中二极管的 TCV 提供了可借鉴的方法和结构,但由于二极管对像

素的影响并不局限于 TCV,因此综合考察二极管对电路以及器件性能的影响,进而指导小像素中二极管结构的设计仍具有必要性和重要性。

为此,本文首先分析了二极管对读出电路以及器件性能的影响,确定了二极管工作的最优正向偏置电流,并从中提炼出了二极管主要性能影响因素;在此基础上,提出了 p^+n - pn - n^+p 三合一二极管结构设计;并对比考察了包括其在内的 6 种不同二极管结构主要性能影响因素之间的关系,得到其为小像素情况下的最优结构设计;最后,利用 Sentaurus TCAD 仿真软件进行了仿真验证。

1 工作原理

以一个 p 区 n 区掺杂浓度分别为 10^{16}cm^{-3} 、 10^{18}cm^{-3} 的二极管为例,图 1 给出了利用 SentaurusTCAD 仿真软件仿真得到的温度特性曲线。从图中可以看出,随着温度的升高,二极管 I - V 曲线向左偏移。当给二极管通以恒流偏置时,二极管两端的电压将随温度的升高而降低,从而实现热信号向电压信号的转换。

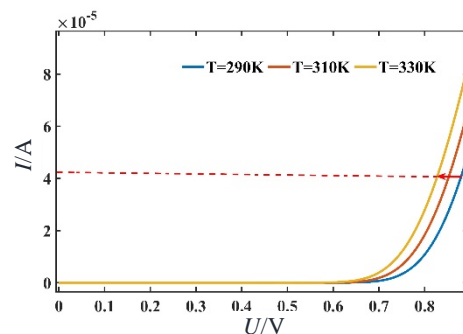


图 1 二极管的温度特性曲线

Fig.1 Temperature characteristic curves of diode

IRFPA 中单个像素的结构示意图如图 2 所示,敏感区通过支撑梁悬空在隔热腔上方。敏感区由红外吸收层以及热敏元件,即串联的二极管组成。当红外吸收层吸收红外辐射将光能转化为热能后,恒流偏置下的串联二极管输出电压变化,该变化的电压通过支撑梁中的信号线引出与读出电路连接,最终实现探测。

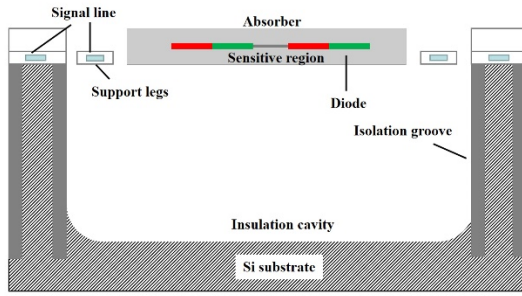


图2 单个像素结构示意图

Fig.2 Single pixel structure

2 理论分析

2.1 电路性能

像素中的二极管与读出电路相连，作为负载时其漏电流、电容必须考虑。

由于二极管反向漏电流的存在，会使得二极管的实际正向偏置电流小于给定的正向偏置电流。二极管的电流电压方程式为：

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中： J_s 为反向饱和电流密度，大小主要与温度、材料有关； q 为电子电荷； V 为二极管两端的电压； T 为温度； k_0 为玻尔兹曼常数^[13]。

反偏电压下， $V < 0$ ，当 $|V| \gg k_0 T/q$ 时， $\exp(qV/k_0 T)$ 的值趋于0，对于含有 N 个二极管串联的结构，反向漏电流有：

$$I_s = - \sum_{i=1}^N A_i J_s = - A_a J_s \quad (2)$$

式中： N 为结构中二极管串联的数目； A_i 为结构中任意单个二极管的结面积； A_a 为总体结面积。

二极管的寄生电容主要影响与之相连开关电路的延迟时间，寄生电容越大，开关接通时对其充放电的时间越长，因此对开关驱动能力的要求越高。

在恒定的正向电流下，pn结两端正向电压较大，此时的电容主要以扩散电容为主：

$$C_D = \left[A q^2 \frac{(n_{p0} L_n + p_{n0} L_p)}{k_0 T} \right] \exp\left(\frac{qV_F}{k_0 T}\right) \quad (3)$$

式中： n_{p0} 、 p_{n0} 分别为n区及p区少子浓度； L_n 、 L_p 为电子与空穴的扩散长度； V_F 为正向电压的大小^[13]。

若结构中 N 个二极管串联时，其总电容 C_a 满足：

$$\frac{1}{C_a} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_{Di}} > \frac{1}{C_{Di}} \quad (4)$$

式中：可发现总电容 C_a 总小于 N 个串联二极管中的任意单个二极管的电容 C_{Di} ，即 $C_a < C_{Di}$ 。

图3为根据公式(2)~(4)得到的总电容 C_a 与漏电流 I_s 随总结面积 A_a 变化的关系曲线。从图中可以看出，总电容与漏电流随结面积的增大而增大。当总结面积小于 $1000 \mu\text{m}^2$ 时，漏电流的值在 1.7 nA 以下，电容值保持在 120 nF 以下，均保持在非常小的量级范围，故对读出电路影响较小。

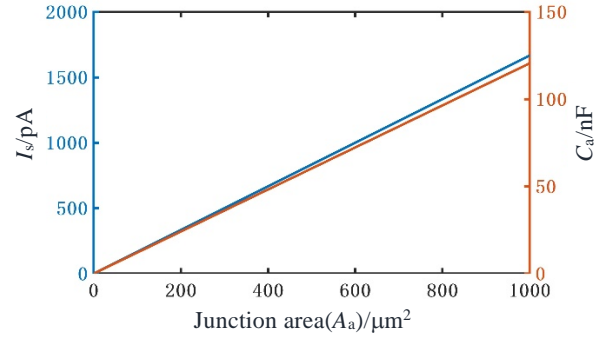


图3 总电容 C_a ，漏电流 I_s 与结面积 A_a 的理论关系

Fig.3 Theoretical relationship between total capacitance C_a , leakage current I_s and junction area A_a

2.2 器件性能

器件性能主要包括：NETD和响应时间^[14]。由于响应时间主要由结构的热学参数决定^[1]，因此，二极管作为热敏元件主要影响NETD。

NETD是在带有焦平面阵列（focal plane array, FPA）的成像系统视场中，探测的目标温度发生变化时，引起输出信噪比以及读出电路信号产生最小单位变化时的温度变化量^[15-16]，可表示为：

$$\text{NETD} = \frac{4F^2 V_n}{\tau_0 S R (\Delta P / \Delta T)_{\lambda_1 - \lambda_2}} \quad (5)$$

式中： F 为光学系统光圈数； τ_0 为光学系统的透射率；

$(\Delta P / \Delta T)_{\lambda_1 - \lambda_2}$ 为探测目标在温度 T 下，从 λ_1 到 λ_2 的范围内每单位面积上的辐射功率变化量； S 为红外吸收区面积； V_n 为噪声电压； R 为响应率，这两个参数与作为热敏元件的二极管相关。

在此，定义响应率与噪声之比为响应噪声比 f_0 ，有：

$$f_0 = \frac{R}{V_n} \quad (6)$$

式中：与二极管相关的噪声有PN结散粒噪声以及 $1/f$ 噪声，对于噪声电压有：

$$V_n = N \sqrt{\left(k_0 T \sqrt{\frac{2 \Delta f}{q I_f}} \right)^2 + \left(r_{\text{dtotal}} \sqrt{\frac{K_d I_f^a}{f}} \Delta f \right)^2} \quad (7)$$

式中： I_f 为正向偏置电流； Δf 为噪声积分带宽； r_{dtotal}

为总动态电阻; K_d , a 为工艺参数; f 为工作频率^[17]。
响应率 R 定义为输出电压除以输入辐射能量, 可表达为:

$$R = \frac{TCV \cdot \Delta T}{P_0} \quad (8)$$

式中: P_0 表示输入单位时间的输入辐射能量^[15]。其中, 结构中 N 个二极管串联时, TCV 可表达为:

$$TCV = \sum_{i=1}^N \frac{k}{q} \left\{ \ln \frac{I_f h^6}{32 A_i q \pi^3 k^3 (m_n m_p)^{\frac{3}{2}} T^3 \left[\left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N_a} + \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N_d} \right]} - 3 \right\} \quad (9)$$

式中: h 为普朗克常量; D_n 为电子扩散系数; D_p 为空穴扩散系数; τ_n 为电子在 p 区的复合时间; τ_p 为空穴在 n 区的复合时间; m_n 为电子有效质量; m_p 为空穴有效质量; N_d 为施主浓度; N_a 为受主浓度。

根据式(6)~(9), 图4给出了响应噪声比 f_0 与正向偏置电流 I_f 的关系曲线。从图中可看出, 随着 I_f 的增大, f_0 先增大后减小, 并在 $10 \mu A$ 处, 存在极大值。主要由于噪声电压 V_n 随 I_f 的增大先减小后增大所致。因此, $10 \mu A$ 为二极管工作的最优正向偏置电流。

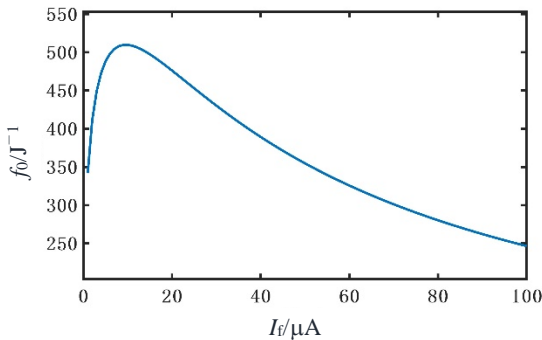


图4 响应噪声比 f_0 与偏置电流 I_f 的理论关系

Fig.4 Theoretical relationship between response-to-noise ratio f_0 , bias current I_f

假设结构中单个二极管的结面积均为 A_i 时, 图5给出了 TCV 随单个二极管结面积 A_i 与结构中二极管串联的个数 N 的变化趋势图。从图中可知, 当 N 一定时, 增加二极管的结面积会使 TCV 增大; 当结面积一定时, 增加 N 值也会使得 TCV 增大, 且比增大 A_i 值提升效果更明显。

3 二极管设计与比较

如图6所示, 考察了6种二极管结构, 分别为: (a)传统二极管结构、(b)回型二极管结构、(c) p^+n-n^+p 二合一二极管、(d)和(e)分别为在 p^+n-n^+p 二合一二极管基础上直接拓展得到的 $2n^+p-p^+n$ 三合一二极管和 $2p^+n-n^+p$ 三合一二极管、以及(f) $p^+n-pn-n^+p$ 三合一二

极管。其中, 结构b为本课题组张强等人提出^[11]; 结构c为三菱提出^[12]; 结构d是在结构c的基础上, 增加了 n 型重掺杂区结构, 构成由 p^+n , n^+p , n^+p 组成的三合一二极管结构; 结构e在结构c的基础上, 增加了 n 阱与 p 型重掺杂区结构, 构成了 p^+n , p^+n , n^+p 组成的三合一二极管结构; 结构f为在结构c的 n 阱与 n 型重掺杂区之间的区域加入 n 阱, 与 p 型 Si 衬底形成一个新的 pn 结, 从而形成了 p^+n , pn , n^+p 三个二极管串联的结构, n 阱中 n 型重掺杂区用以形成欧姆接触。按此方法可继续在结构f的基础上进行拓展, 形成 N 合一二极管。

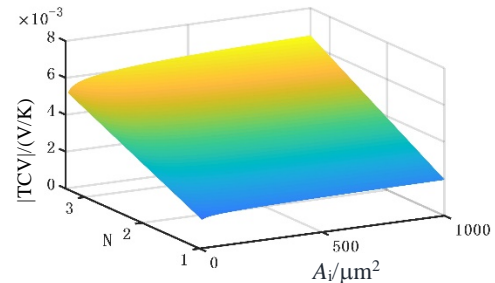


图5 TCV 随结面积 A_i 与二极管串联的个数 N 的变化趋势

Fig.5 TCV changes with the junction area A_i and the number of diodes in series N

如前述讨论, 当二极管工作在最优恒流偏置情况下, 总结面积 A_a 越大虽然会使漏电流及电容增大, 但由于增大的漏电流及电容量级较小从而对读出电路的影响较小, 因而 A_a 的增大主要影响 TCV 的提升。在此, 设 pn 结总结面积 A_a 与 pn 结整体尺寸 S_a 之比为有效结面积比 Z , 即:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{S_a} = \frac{A_a}{S_a} \quad (10)$$

该值可表示在像素单位面积里的结面积大小。 N 相同时, 不同二极管结构在相同设计规则下的 Z 值越大表明该结构在相同像素面积下的单个 pn 结结面积

A_i 越大, 即总结面积 A_a 越大, 因而 TCV 也越大。

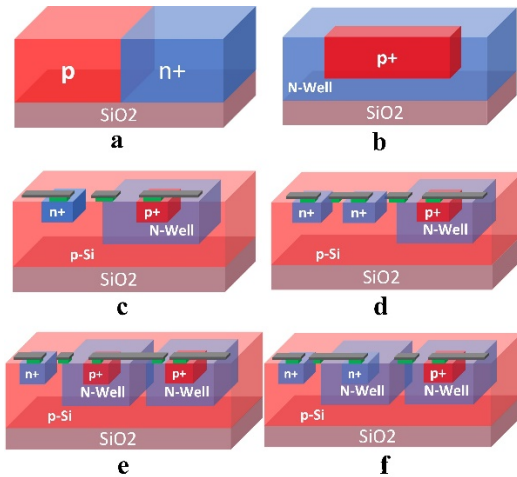


图6 二极管结构(a)传统二极管 (b)回型二极管 (c) p^+n-n^+p 二合一二极管 (d) $2p^+n-n^+p$ 三合一二极管 (e) $2p^+n-n^+p$ 三合一二极管 (f) $p^+n-pn-n^+p$ 三合一二极管

Fig.6 Diode structure (a) Traditional diode (b) "well" shape diode (c) p^+n-n^+p 2-in-1 diode (d) $2p^+n-n^+p$ 3-in-1 diode (e) $2p^+n-n^+p$ 3-in-1 diode (f) $p^+n-pn-n^+p$ 3-in-1 diode

设 pn 结结长为 a , 结宽为 b , 整体厚度为 T_1 , n 型与 p 型重掺杂区深度为 T_2 , n 阱的深度为 T_3 , 不同掺杂区之间的距离为 m ; m 值的大小与设计规则相关。由此可得以上 6 种结构的 Z 值计算式分别为:

$$Z_a = \frac{a \times T_1}{b \times a} \quad (11)$$

$$Z_b = \frac{(a+b) \times 2T_2 + ab}{(a+m)(b+m)} \quad (12)$$

$$Z_c = \frac{(a+b) \times 4T_2 + 2ab}{(2a+5m) \times (b+4m)} \quad (13)$$

$$Z_d = \frac{(a+b) \times 6T_2 + 3ab}{(3a+6m) \times (b+4m)} \quad (14)$$

$$Z_e = \frac{(a+b) \times 6T_2 + 3ab}{(3a+8m) \times (b+4m)} \quad (15)$$

$$Z_f = \frac{(a+b) \times (4T_2 + 2T_3 + 2) + 8T_3 + 3ab + 4}{(3a+8m) \times (b+4m)} \quad (16)$$

设 $m=1\mu\text{m}$, $T_1=1\mu\text{m}$, $T_2=0.5\mu\text{m}$, $T_3=0.8\mu\text{m}$ 。根据公式(11)~(16), 6 种结构在 $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 尺寸下各自的总结面积, Z 值及 N 值大小如表 1 所示。表中可知, 结构 d、e、f 为 3 个二极管串联, 个数明显多于结构 a、b、c。同时在结构 d、e、f 中, 很显然地, Z 值关系由大到小依次是结构 f、d、e。结合前述分析, 理论上采用结构 f 的器件因在同样面积下具有最多的二极管个数和最大的结面积, 故性能将最优。

4 仿真数据

利用 Sentaurus TCAD 仿真软件对以上 6 种二极管结构进行仿真, 6 种二极管的结构参数均与表 1 对应, n 型与 p 型重掺杂区的掺杂浓度为 10^{18}cm^{-3} , n 阱与 p 型硅的掺杂浓度为 10^{16}cm^{-3} 。

表 1 6 种结构同尺寸下的 Z 值与 N 值的大小

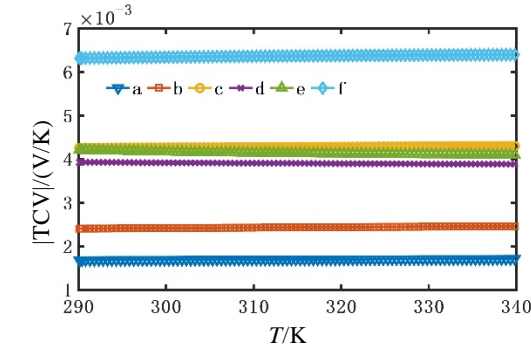
Table 1 The Z value and N value under the same size of 6 structures

Structure	$A_a/\mu\text{m}^2$	$S_a/\mu\text{m}^2$	Z	N
a	30	30×30	0.0333	1
b	840	30×30	0.9333	1
c	727	30×30	0.8070	2
d	726	30×30	0.8067	3
e	645	30×30	0.7167	3
f	741.2	30×30	0.8236	3

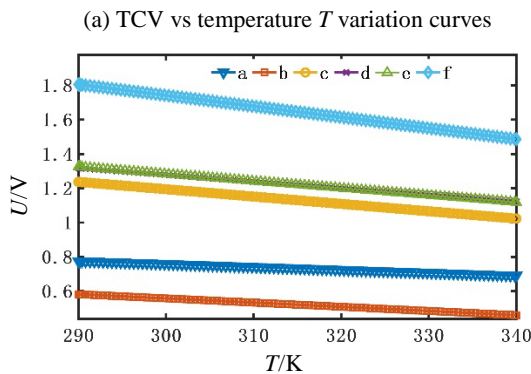
图 7 给出了 6 种结构在正向电流 $10\mu\text{A}$ 偏置下的 TCV 与静态工作电压仿真结果。图 7(a)展示了 6 种结构在不同温度下的 TCV 值, 从大到小依次是结构 f、c、e、d、b、a。对于结构 d 与结构 e, N 值虽为 3, 但两者的 TCV 值却与 $N=2$ 的结构 c 相接近且略小于后者, 根据图 7(b)六种结构的正向电压随温度变化曲线可以看出, 结构 d、e 的正向电压值与结构 c 较接近, 与结构 f 电压值相差了约 1 个二极管电压差 (约 0.6V)。当温度变化范围较小时, TCV 可看成恒定值。结构 f 的 TCV 值分别约为结构 c、d、e 的 1.5 倍, 为结构 a 与结构 b 的 2.6 倍, 3.7 倍。证明了 6 种结构中, 结构 f 性能最优。若在结构 f 的基础上拓展得到 N 合一二极管结构, TCV 值也将因此增大。

之所以结构 d、e 相对于结构 c 增加了串联二极管个数, 但表现出的正向电压与 TCV 未如理论分析的随着串联个数的增加而增加, 是因为在这两个结构中, 分别引入了额外的并联电阻与寄生三极管。图 8(a)为结构 d 的等效电路图, 电流在经过结构右端的 p^+n 结后全部进入 p 型衬底区, 此时结构中拓展的 n 型重掺杂区范围较小, 导致该区域下的衬底所寄生出的电阻 r 较小, r 与结构中拓展的 n^+p_1 结并联, 因此使得电流大部分从寄生电阻 r 的支路经过结构左端的 n^+p_2 结流出, 导致 n^+p_1 结未起到提升结构 TCV 的作用。图 8(b)为结构 e 的等效电路, 结构右端 n 阱, p 型衬底与结构左端的 n 型重掺杂区形成的 npn 型寄生三极管, 电流在经过结构右端的 p^+n_1 结后经中部拓展的 p^+n_2 到达衬底, 此时的衬底电位 V_B 低于结构右端 n 阱的电位 V_C , 高于结构右端 n 型重掺杂区的电位 V_E , 使得寄生三极管处于导通状态, 因此电流流过 p^+n_1 结

后直接经寄生三极管流出, 使得 p^+n_2 结未起到提升结构 TCV 的作用。



(a) TCV 随温度 T 变化曲线

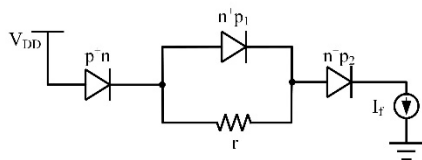


(b) 电压 U 随温度 T 变化曲线

(b) Voltage U vs temperature T variation curves

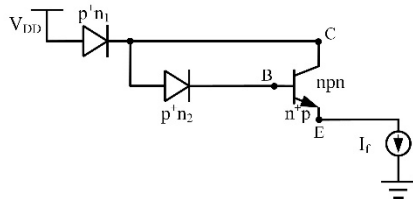
图7 Sentaurus 器件仿真

Fig.7 Sentaurus device simulation



(a) p^+n-2n^+p 三合一二极管

(a) The p^+n-2n^+p three-in-one diode



(b) $2p^+n-n^+p$ 三合一二极管

(b) The $2p^+n-n^+p$ three-in-one diode

图8 等效电路图

Fig.8 The equivalent circuit diagram

图9为结构f随着整体尺寸减小时TCV的仿真情况。X轴表示整体尺寸面积, Y轴表示TCV值的大小。从图中可得, TCV随着整体尺寸的减小而减小, 这是由于整体尺寸减小使得结构f的有效结面积减

小。但是结面积在减小了约 $700\mu m^2$ 后 TCV 仅减小了约 $0.3mV/K$, 即结构f在小像素尺寸下也依然具有较好的性能。

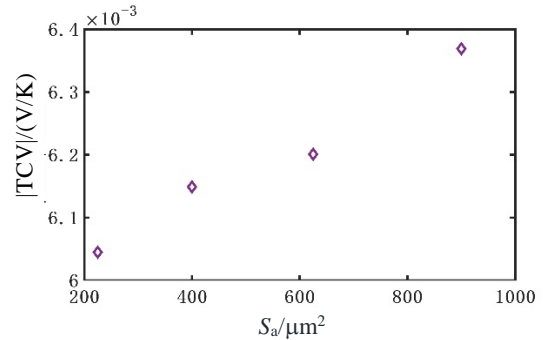


图9 结构f不同尺寸下的TCV仿真结果

Fig.9 TCV simulation results under different sizes of structure f

5 总结

本文基于二极管在IRFPA中的工作原理, 从电路性能及器件性能的角度对二极管的主要结构影响因素进行了分析, 当结构中二极管总体结面积在 $1000\mu m^2$ 内时二极管的漏电流与寄生电容预估值保持在 $1.7nA$ 及 $120nF$ 内, 对电路的影响较小。响应噪声比 f_0 在偏置电流为 $10\mu A$ 附近存在极大值, 故该电流为二极管的最佳偏置电流。TCV会随着二极管串联个数和结面积增加而增加, 且增加二极管串联个数对TCV的提升效果明显优于增加结面积。因此, 将结构中二极管的串联个数 N 以及总体结面积 A_a 作为主要影响器件性能的结构影响因素。由此设计了 $p^+n-pn-n^+p$ 三合一二极管, 通过理论和 SentaurusTCAD 仿真软件对比分析发现, $p^+n-pn-n^+p$ 三合一二极管在同样面积下具有最多的二极管个数和最大的结面积, 且避免了并联电阻或寄生三极管的影响, 因此为6种二极管结构设计中的最优结构。同时, 在其基础上拓展可得到 N 合一二极管能进一步优化器件的性能, 为优化IRFPA中单个像素的热敏元件二极管结构提供参考。

参考文献:

- [1] LIU C, FU J, HOU Y, et al. An effective method for evaluating thermal parameters of diode-based thermal sensors[J]. *Measurement*, 2020, **156**: 107621.
- [2] 余黎静, 唐利斌, 杨文运, 等. 非制冷红外探测器研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2021, **50**(1): 20211013-1-20211013-15.
- [3] YU Lijing, TANG Libin, YANG Wenyun, et al. Research progress of uncooled infrared detectors(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, **50**(1): 20211013-1-20211013-15.
- [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 Tao, JIN Weiqi, SI Junjie. Uncooled Infrared FPA--A Review and Forecast[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(3): 177-184.
- [4] 黄卓磊. 二极管型非制冷红外成像技术研究[D]. 北京: 中国科学院微电子研究所, 2015.
- HUANG Zhuolei. Research on Diode Uncooled Infrared Imaging Technology [D]. Beijing: Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [5] 李静, 宋广, 董珊, 等. 非制冷红外焦平面探测器研究进展与趋势[J]. 红外, 2020, **41**(10): 1-14, 24.
- LI Jing, SONG Guang, DONG Shan, et al. Progress and Trend of Uncooled Infrared Focal Plane Detectors[J]. *Infrared*, 2020, **41**(10): 1-14, 24.
- [6] Hanaoka M, Kosasayama Y, Hata H, et al. 80×32 SOI diode-based uncooled IRFPAs for thermal detectors[C]//*Infrared Technology and Applications XLVII*, 2021, **11741**: 1174112.
- [7] Ishikawa T, Ueno M, Nakaki Y, et al. Performance of 320×240 uncooled IRFPA with SOI diode detectors[C]//*Infrared Technology and Applications XXVI*, 2000, **4130**: 152-159.
- [8] Fujisawa D, Maegawa T, Ohta Y, et al. Two-million-pixel SOI diode uncooled IRFPA with 15μm pixel pitch[C]//*Infrared Technology and Applications XXXVIII*, 2012, **8353**: 83531G.
- [9] Fujisawa D, Hanaoka M, Kosasayama Y, et al. Development of new pixel structure for beyond 12-μm pixel pitch SOI diode uncooled IRFPAs[C]//*Infrared Technology and Applications XLVI. International Society for Optics and Photonics*, 2020, **11407**: 114071A.
- [10] SHEU M L, SUN T P, Shie M C. Measurement of Dark Current of Infrared Detector in Focal Plane Array[C]//*Proceedings of 12th VLSI Design/CAD Symposium*, 2001: B3-8.
- [11] 张强, 刘瑞文, 吕文龙, 等. 非制冷热敏二极管型红外焦平面阵列电压温度系数的分析与优化[J]. 微纳电子技术, 2018, **55**(9): 617-624.
- ZHANG Qiang, LIU Ruiwen, LV Wenlong, et al. Analysis and optimization of the voltage temperature coefficient of a thermodiode uncooled infrared focal plane array[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2018, **55**(9):617-624.
- [12] Takamuro D, Maegawa T, Sugino T, et al. Development of new SOI diode structure for beyond 17 μm pixel pitch SOI diode uncooled IRFPAs[C]//*Infrared Technology and Applications XXXVII*, 2011, **8012**: 80121E.
- [13] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 156-180.
- LIU Enke, ZHU Bingsheng, LUO Jingsheng. *Semiconductor Physics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 156-180.
- [14] 刘子骥, 赵晟晨, 赵征庭, 等. 非制冷红外焦平面阵列器件的热时间常数测试方法[J]. 红外与激光工程, 2019, **48**(12): 1204003-1204003.
- LIU Ziji, ZHAO Shengchen, ZHAO Zhengting, et al. A test method of thermal time constant for uncooled infrared focal plane array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(12): 1204003-1204003.
- [15] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 171-264.
- ZHOU Shichun. *Introduction to Advanced Infrared Optoelectronic Engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2014: 171-264
- [16] 吕玉菲. 25μm 像素尺寸 SOI 二极管型红外焦平面阵列的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- LYU Yufei. Research on 25μm Pixel Size SOI Diode Type Infrared Focal Plane Array[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [17] Ueno M, Kosasayama Y, Sugino T, et al. 640×480 pixel uncooled infrared FPA with SOI diode detectors[C]//*Infrared Technology and Applications XXXI. International Society for Optics and Photonics*, 2005, **5783**: 566-577.