第 XX 卷第 XX 期
XXXX 年 XX 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. XX, No. XX
XX, XXXX

文章编号:1001-9014(XXXX)XX-0001-07

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. XXXX. XX. 001

高密度平面型InGaAs焦平面像元耦合作用数学模型

杜爱博[1,2], 于春蕾[1*], 邵秀梅[1*], 于金瀛[1,2], 宝鹏飞[1,2], 陆劲速[1], 杨 波[1],
朱宪亮[1], 李 雪[1]

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室,上海 200083;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:InGaAs焦平面探测器的应用追求高密度小中心距,中心距的减小加强了面阵像元间的相互耦合作用。本文通过制备不同规模5 μm中心距InGaAs小面阵器件,研究高密度焦平面像元耦合作用,创新地引入矩阵方程描述各部分的暗电流贡献,构建像元耦合数学模型,定量分析了耦合作用导致的暗电流贡献。结果表明,在-0. 1 V偏压下,面阵中反偏状态像元对邻近反偏状态像元的暗电流抑制程度为像元本底暗电流的21. 39%;零偏状态像元对邻近反偏状态像元的暗电流增幅程度可达219. 42%。利用高密度焦平面像元耦合模型,总结了像元耦合对暗电流的影响规律,为高密度InGaAs焦平面的暗电流研究提供了新的思路。

关 键 词:铟镓砷;焦平面;5 μm中心距;暗电流;像元耦合作用

中图分类号:TN215 **文献标识码**: A

Mathematical model of pixel coupling in high-density planar InGaAs focal plane arrays

DU Ai-Bo[1,2], YU Chun-Lei[1*], SHAO Xiu-Mei[1*], YU Jin-Ying[1,2], BAO Peng-Fei[1,2],
LU Jin-Su[1], YANG Bo[1], ZHU Xian-Liang[1], LI Xue[1]

(1. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The application of InGaAs focal plane arrays (FPAs) requires high density and small pixel pitch. However, as the pixel pitch decreases, the pixel coupling becomes stronger. By fabricating 5 μm pitch InGaAs arrays with different scales, the pixel coupling effects in high-density InGaAs arrays were studied. Innovatively, matrix equations were introduced to describe the contributions of dark current from each part, and a mathematical model of pixel coupling was constructed, and the contributions of the dark current resulting from the coupling effects were quantitatively analyzed. The results indicated that at a bias voltage of -0. 1 V, reverse-biased pixels in the array can reduce the dark current of adjacent reverse-biased pixels by 21. 39% of the pixel's initial dark current. In contrast, zero-biased pixels can increase the dark current of adjacent reverse-biased pixels by 219. 42%. Based on this high-density focal plane pixel coupling model, the impact rules of pixel coupling on dark current have been summarized, providing new insights for dark current research in high-density InGaAs focal plane arrays.

Key words: InGaAs, focal plane, 5 μm pixel pitch, dark current, pixel coupling effect

引言

在现代光电探测技术中,InGaAs焦平面探测器因其在短波红外波段的高灵敏度和快速响应时间,在空间遥感、工业检测、夜视成像以及医疗成像等领域得到广泛应用[1]。各应用领域对高空间分辨率的需求,使得高密度大规模InGaAs焦平面探测器成

收稿日期:2024-11-14,**修回日期**:2025-01-29 **Received date**:2024-11-14,**Revised date**:2025-01-29
基金项目:国家自然科学基金(62175250)
Foundation items:Supported by the National Natural Science Foundation of China (62175250)
作者简介(Biography):杜爱博(2000-),男,安徽凤阳人,硕士研究生,主要研究领域为短波红外探测器. E-mail: duaibo22@mails. ucas. ac. cn
[*] **通讯作者**(Corresponding author): E-mail: yuchunlei@mail. sitp. ac. cn;shaoxm@mail. sitp. ac. cn

为研究热点。目前，国外的Attollo Engineering公司和Sony公司已分别推出了5 μm中心距和3.45 μm中心距的商用InGaAs焦平面器件[2-6]，STMicroelectronics公司也成功制备了5 μm中心距器件，并验证了向3 μm中心距迈进的可能性[7]；国内的中国科学院上海技术物理研究所也实现了2560×2048像元10 μm中心距InGaAs焦平面探测器的制备[8]。

根据文献[9]，296 K温度下空穴扩散长度为19.64 μm，273 K、253 K时则分别为18.53 μm、17.09 μm，对于常规工作温度下的高密度InGaAs焦平面探测器，像元中心距已明显小于空穴扩散长度，这导致相邻像元之间相互耦合，引发串扰，使探测器分辨率降低、成像质量下降。因此，深入研究像元间的相互耦合作用，对于优化器件设计、提高系统性能具有重要意义。本文将从暗电流出发，分析无光条件下的像元耦合作用。目前对InGaAs焦平面暗电流机理的研究角度主要有理论层面与器件结构层面两种。在理论层面，总的暗电流被拆分为对应不同物理过程的扩散电流、产生复合电流、隧穿电流等；在器件结构层面，由与光敏元面积成正比的体电流和与光敏元周长成正比的侧面电流的组合来描述暗电流，其中，体电流又可分为体扩散电流、体产生复合电流等，侧面电流又可分为侧面扩散电流、来自InP帽层的产生复合电流、来自InGaAs吸收层的产生复合电流、界面电流等。两种研究角度相互交织，根据各个电流机制的表达式，拟合分析不同部分电流对器件总暗电流的贡献，进而对暗电流的主要来源进行分析，该方面已有各团队进行了大量的工作[7,10-13]。

目前对暗电流机理的研究，大部分研究对象为单个像元或面阵整体，而焦平面中像元相互耦合导致的暗电流影响却鲜有报道。本文通过制备不同规模的5 μm中心距InGaAs小面阵器件，构造像元耦合作用的数学模型，创新地引入矩阵方程描述各部分的暗电流贡献，定量分析了像元耦合导致的暗电流贡献，总结了高密度InGaAs焦平面中像元耦合作用对暗电流的影响规律。

1 实验

为了分析像元耦合作用对暗电流的影响，本实验设计了8种不同规模的5 μm中心距小面阵器件。所用材料为在InP衬底上依次外延生长N^+-InP缓冲层、N^--$In_{0.53}Ga_{0.47}As$吸收层、N^--InP帽层的复合外延材料，外延材料结构参数见表1，8种小面阵器件结构如图1所示。

表 1 外延材料结构参数

Table 1 The structural parameters of epitaxial material

层	材料	厚度/μm	N_D-掺杂浓度/cm^{-3}
帽层	InP	1.0	1.25E16
吸收层	$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	2.5	5E15
缓冲层	InP	2.0	2~4E18
衬底	InP	625±25	半绝缘

在InP帽层表面淀积形成扩散掩膜层之后，小面阵器件首先由反应性离子刻蚀(reaction ion etching, RIE)工艺在扩散掩膜层上打开直径1.5 μm的圆形扩散窗口；再采用闭管扩散掺杂工艺，以Zn_3P_2作为扩散源，使帽层InP由N^-型变为P型掺杂，从而形成PIN结构的光敏像元；采用离子束溅射沉积形成P区接触电极，制备得到规模为11×11(或12×12)的阵列。淀积钝化膜后，在11×11(或12×12)的阵列上，由RIE刻蚀工艺开通不同数量的电极孔与加厚电极相连，制备得到8种不同规模的小面阵器件。小面阵器件的8种规模分别是1×1、2×2、3×3、4×4、5×5、6×6、7×7、8×8。

2 结果讨论与分析

2.1 焦平面像元耦合作用现象

对不同规模的小面阵器件，测试了室温下暗电流*I*-*V*曲线，*I*-*V*测试系统采用Agilent B1500A半导体器件分析仪，样品置于真空状态的测试腔内。测试结果如图2所示，小面阵器件的总暗电流随面阵规模的增大而增大，变化趋势符合预期。

分析-0.1 V偏压下的暗电流数据。如图3(a)所示，小面阵器件的总暗电流随面阵规模的增大而增大，但当面阵规模较大时，其暗电流的增加趋势变缓，整体变化趋势与线性趋势存在偏差；如图3(b)所示，小面阵器件的暗电流密度则随着面阵规模的增大而下降，下降趋势随着面阵规模的增大而变缓，且1×1规模小面阵器件暗电流密度明显高于其他规模器件。这表明对于高密度焦平面器件，像元之间存在影响暗电流的相互作用。

在5 μm中心距面阵中，因像元中心距远小于载流子扩散长度，像元收集邻近像元区域中的载流子，导致像元间相互耦合，产生载流子的“竞争”。这种“竞争”效应是相互的，最终结果表现为面阵中每个像元收集的载流子数量均少于其独立存在时

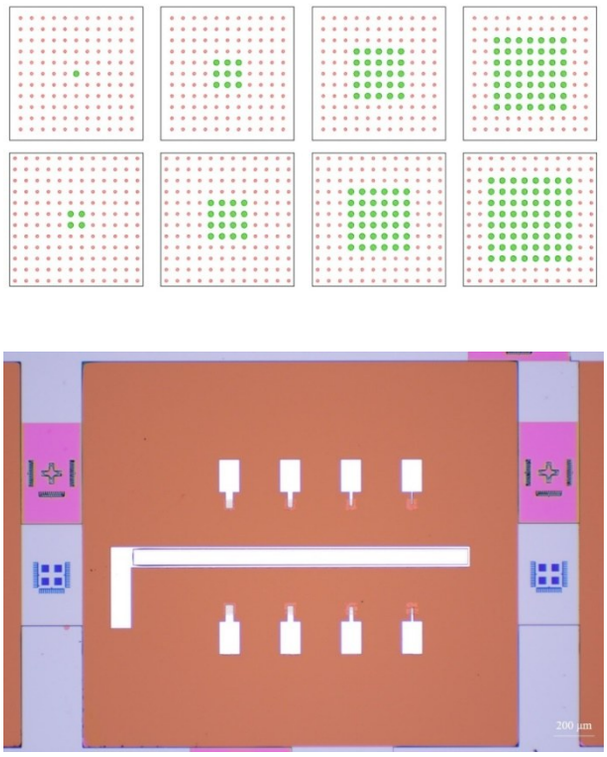


图 1　不同规模5 μm中心距InGaAs小面阵示意图与显微镜照片

Fig. 1　The schematic diagram and microscopic picture of different scales of 5 μm pitch InGaAs arrays

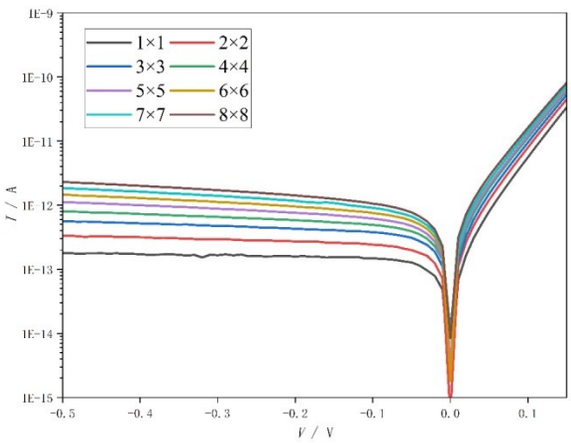


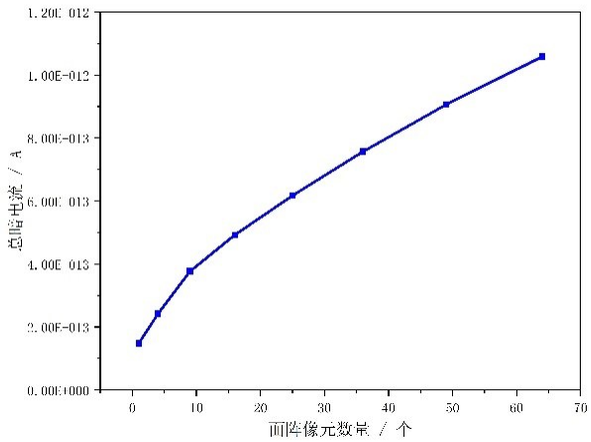
图 2　不同规模InGaAs小面阵器件室温下暗电流*I-V*曲线

Fig. 2　Dark current *I-V* curves of different scales of InGaAs arrays at room temperature

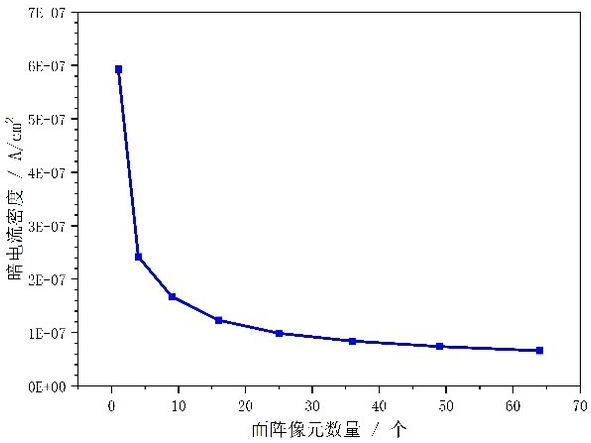
的收集数量,导致暗电流密度下降,这也是1×1规模小面阵器件暗电流密度明显高于其他规模器件的原因。

2.2　像元耦合作用的数学模型

为了定量分析高密度焦平面像元耦合作用,需



(a)



(b)

图 3　不同规模InGaAs小面阵器件在-0.1 V偏压下的测量结果:(a) 总暗电流;(b) 暗电流密度

Fig. 3　Measurement results of different scales of InGaAs arrays at -0.1 V: (a) total dark current; (b) dark current density

要构建数学模型。假设面阵中的每一个像元,只与其最近邻的4个像元发生相互耦合,且4个最近邻像元对中心像元的耦合贡献彼此相互独立。则面阵中单个像元的暗电流表达式为:

$$I_{\text{single}} = I_i + C_{1,0} + C_{0,1} + C_{-1,0} + C_{0,-1} \quad , \quad (1)$$

如图4所示,I_i为像元独立存在时的本底暗电流,$C_{1,0}$, $C_{0,1}$, $C_{-1,0}$, $C_{0,-1}$分别为4个最近邻像元对中心像元暗电流的贡献值,其中下标(1,0)等是近邻像元与中心像元的相对坐标。贡献值的具体数值将由像元的状态决定。

本实验的小面阵器件均是在11×11(或12×12)规模的阵列上,通过引出不同数量的像元而形成的。因此,小面阵器件中的像元,其最近邻像元仅

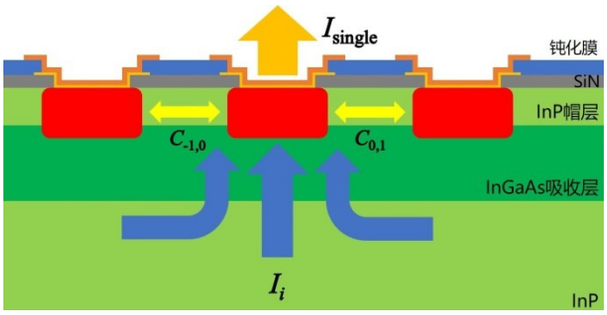


图4 单个像元暗电流示意图

Fig. 4 The schematic diagram of single pixel dark current

存在两种状态:反偏或零偏。设反偏像元的耦合贡献值为C_{bias},零偏像元的耦合贡献值为C_{zero}。

如图5所示,以3×3规模小面阵器件为例,根据4个最近邻像元的状态,可将9个面阵像元分为3类,分别由像元1、像元2、像元3代表。由式(1)和上述假设,三类像元的暗电流表达式可写为:

$$\begin{cases} I_1 = I_i + 4C_{bias} \\ I_2 = I_i + 3C_{bias} + C_{zero} \\ I_3 = I_i + 2C_{bias} + 2C_{zero} \end{cases}, \quad (2)$$

因此,3×3规模小面阵器件的总暗电流表达式为:

$$I_{3\times3} = I_1 + 4I_2 + 4I_3 = 9I_i + 21C_{bias} + 12C_{zero}, \quad (3)$$

写为矩阵形式则为:

$$\begin{aligned} I_{3\times3} &= (9 \quad 21 \quad 12)\times(I_i \quad C_{bias} \quad C_{zero})^T \\ &= g_{3\times3}\times(I_i \quad C_{bias} \quad C_{zero})^T \end{aligned}, \quad (4)$$

其中,行向量$g_{3\times3}$ = (9 21 12)完全由小面阵器件的规模决定,与像元的几何结构或状态均无关;列向量$(I_i\ C_{bias}\ C_{zero})^T$则与小面阵器件规模无关,具体数值取决于像元的几何结构、掺杂浓度、偏压等。

综上,本实验中$n\times n$规模小面阵器件的总暗电流表达式为:

$$\begin{cases} I_{n\times n} = g_{n\times n}\times(I_i \quad C_{bias} \quad C_{zero})^T \\ g_{n\times n} = (n^2 \quad 4n(n-1) \quad 4n) \end{cases}, \quad (5)$$

其中,$I_{n\times n}$为小面阵器件的总暗电流,行向量$g_{n\times n}$仅与面阵规模有关,列向量$(I_i\ C_{bias}\ C_{zero})^T$中,三个元素分别表示像元独立存在时的本底暗电流、反偏状态最邻近像元的耦合贡献值、零偏状态最邻近像元的耦合贡献值。本实验中8种规模小面阵器件的g-向量均可由上述公式计算得到,计算结果见表2。

2.3 暗电流拟合

式(5)中,$I_{n\times n}$由实验测试结果给出,g-向量由对应规则计算得到,列向量$(I_i\ C_{bias}\ C_{zero})^T$为待求解参数。8种规模小面阵器件给出8个待求解方程,联立方程组为:

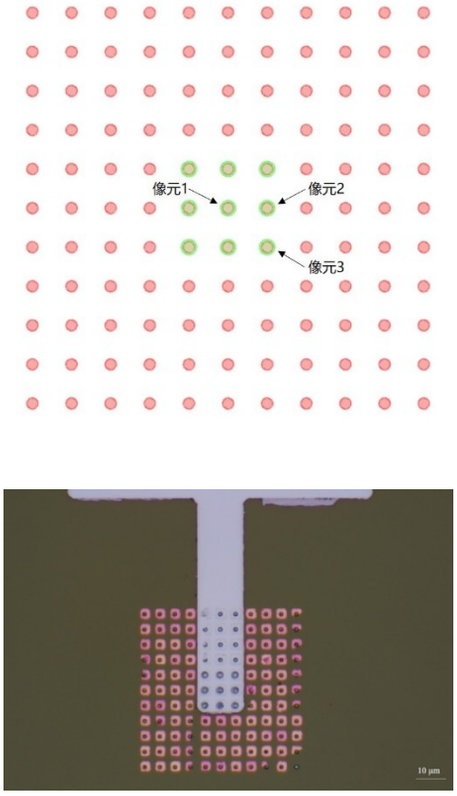


图5 3×3规模小面阵器件示意图与显微镜照片

Fig. 5 The schematic diagram and microscopic picture of 3×3 InGaAs arrays

表2 8种规模InGaAs小面阵器件g-向量计算结果

Table 2 Calculation results of g-vector for eight different-scale InGaAs arrays

g-向量	g_1	g_2	g_3
$g_{1\times1}$	1	0	4
$g_{2\times2}$	4	8	8
$g_{3\times3}$	9	24	12
$g_{4\times4}$	16	48	16
$g_{5\times5}$	25	80	20
$g_{6\times6}$	36	120	24
$g_{7\times7}$	49	168	28
$g_{8\times8}$	64	224	32

$$\begin{cases} I_{1\times1} = g_{1\times1}\times(I_i \quad C_{bias} \quad C_{zero})^T \\ I_{2\times2} = g_{2\times2}\times(I_i \quad C_{bias} \quad C_{zero})^T \\ \vdots \\ I_{8\times8} = g_{8\times8}\times(I_i \quad C_{bias} \quad C_{zero})^T \end{cases}, \quad (6)$$

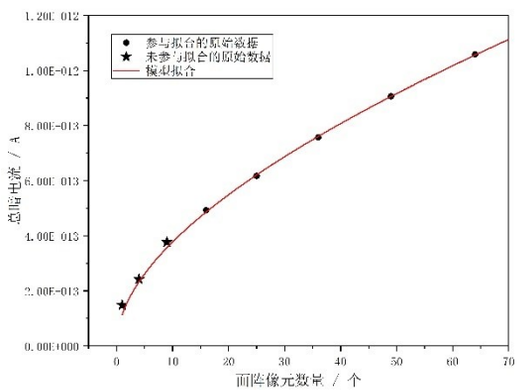
该方程组的矩阵形式为:

$$\begin{pmatrix} I_{1\times1} \\ I_{2\times2} \\ \vdots \\ I_{8\times8} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{1\times1} \\ g_{2\times2} \\ \vdots \\ g_{8\times8} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_i \\ C_{\text{bias}} \\ C_{\text{zero}} \end{pmatrix} = G \times \begin{pmatrix} I_i \\ C_{\text{bias}} \\ C_{\text{zero}} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

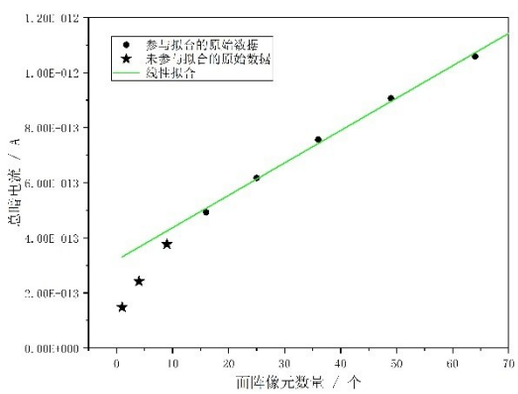
其中,矩阵G是一个8行3列的系数矩阵,矩阵G中的一行即为某个小面阵器件对应的g-向量,具体数值见表2。

由于方程数量大于待求解参数的数量,因此使用最小二乘法对式(7)进行参数求解[14]。由于矩阵G的特性,式(7)求得的最小二乘解中存在一个独立变量,因此只能求得$(I_i\ C_{\text{bias}}\ C_{\text{zero}})^{\text{T}}$的不定解。然而,将不定解代入式(5)后,仍然可以获得拟合曲线。

以4×4、5×5、6×6、7×7、8×8规模小面阵器件的测试数据进行最小二乘解的拟合求解,并将求解结果代回式(5)进行暗电流曲线绘制。同时,使用相同的数据进行线性拟合。使用两种拟合公式对1×1、2×2、3×3规模小面阵器件的总暗电流进行预测,并与实际测试结果进行对比。



(a)



(b)

图6　InGaAs小面阵器件总暗电流的拟合与预测:(a) 模型拟合;(b) 线性拟合

Fig. 6　Fitting and prediction of total dark current of InGaAs arrays: (a) model fitting; (b) linear fitting

表 3　实验测量值与两种拟合方法的预测值

Table 3　Experimental measurement values and predicted values from two fitting methods

小面阵规模	实验测量值/A	模型拟合数值/A	线性拟合数值/A
1×1	1.482e−13	1.137e−13	3.309e−13
2×2	2.419e−13	2.326e−13	3.662e−13
3×3	3.765e−13	3.568e−13	4.250e−13

如图6所示,对1×1、2×2、3×3规模小面阵器件总暗电流的预测,模型拟合明显优于线性拟合,实验测量值与两种拟合方法的预测值见表3。以上结果进一步证明了像素之间存在耦合作用,并验证了像元耦合模型的可靠性。

使用所有8组数据进行式(7)的拟合求解,模型预测值与实测值的对比见表4。除了1×1规模小面阵器件,其他规模器件的模型预测值与实测值的相对误差均小于2.5%。本文所构建的像元耦合模型只考虑了最近邻像元的影响,未包含次近邻及更远距离的像元耦合效应,1×1规模小面阵器件接近20%的相对误差可能来自这一局限性。

表 4　模型拟合预测值与实验测量值的对比

Table 4　Comparison of model fitting predicted values and experimental measurement values

小面阵规模	实验测量值/A	模型拟合数值/A	相对误差
1×1	1.482e−13	1.188e−13	19.81%
2×2	2.419e−13	2.412e−13	0.29%
3×3	3.765e−13	3.671e−13	2.49%
4×4	4.926e−13	4.965e−13	0.79%
5×5	6.172e−13	6.293e−13	1.97%
6×6	7.565e−13	7.657e−13	1.23%
7×7	9.059e−13	9.056e−13	0.03%
8×8	1.058e−12	1.049e−12	0.84%

2.4　模型参数求解与分析

在本实验中,为了求得I_i的数值,在同一块材料上同步制备了P/A测试结构器件。分析得到I_i后,消除了最小二乘解中的独立变量,从而可以求得C_{bias}、C_{zero}的数值,得到确定解。P/A测试结构器件的显微镜照片见图7,各光敏元的尺寸见表5。

从器件结构出发,暗电流可分为体电流(J_{A})和侧面电流(J_{P}),前者与光敏元面积成正比,后者与光敏元周长成正比[7],器件的暗电流与暗电流密度由以下公式表示:

$$\begin{cases} I = J_{\text{A}} \times A + J_{\text{P}} \times P \\ I/A = J_{\text{A}} + J_{\text{P}} \times P/A \end{cases}, \quad (8)$$

图7 *P/A*测试结构器件显微镜照片

Fig. 7 The microscopic picture of the *P/A* test structure device

其中，*A*是光敏元面积，*P*是光敏元周长。*P/A*测试结构器件中每个光敏元均具有不同的*P/A*值，分析*P/A*测试结构器件在-0.1 V偏压下的暗电流密度，根据式(8)进行线性拟合，拟合结果如图8所示。拟合得到：

$$\begin{cases} J_A = 1.07 \times 10^{-8}\ \mathrm{A/cm^2} \\ J_P = 2.54 \times 10^{-11}\ \mathrm{A/cm} \end{cases} . \quad (9)$$

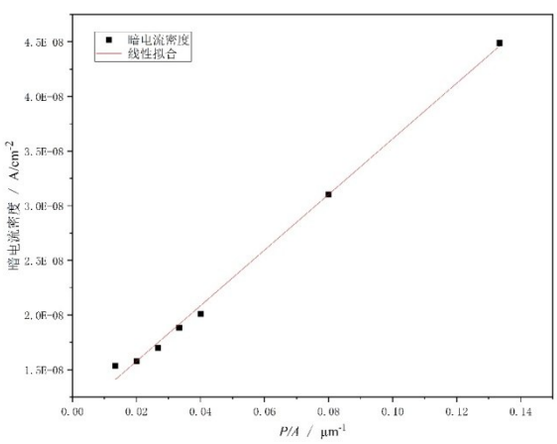


图8 *P/A*测试结构器件暗电流密度@-0.1 V线性拟合

Fig. 8 Linear fitting of dark current density for the *P/A* test structure device at -0.1 V

由式(7)直接求得的不定解为：

$$\begin{cases} I_i + 4C_{\mathrm{bias}} = 1.753\ \mathrm{fA} \\ C_{\mathrm{zero}} - C_{\mathrm{bias}} = 29.279\ \mathrm{fA} \end{cases} . \quad (10)$$

本实验制备的小面阵器件，其光敏元尺寸均为直径1.5 μm的圆孔，代入式(8)，得到单个面阵像元在-0.1 V偏压下的暗电流，即I_i的数值。将其代入式(10)，求解可得C_{bias}、C_{zero}的数值。最终求解结果为：

$$\begin{cases} I_i = 12.158\ \mathrm{fA} \\ C_{\mathrm{bias}} = -2.601\ \mathrm{fA} \\ C_{\mathrm{zero}} = 26.677\ \mathrm{fA} \end{cases} , \quad (11)$$

其中，I_i是像元独立存在并处于反偏状态时的本底暗电流；C_{bias}是反偏状态像元对邻近反偏状态像元的暗电流贡献值，其值为负值，正是“竞争”效应的体现，表现为对邻近像元暗电流的抑制；C_{zero}是零偏状态像元对邻近反偏状态像元的暗电流贡献值，零偏状态像元所在区域的载流子被邻近反偏状态像元收集，导致其所在区域少子浓度下降形成额外的浓度梯度，驱使零偏状态像元P区内的空穴扩散至N区进行补充，其值为正值即表现为对邻近反偏状态像元暗电流的增强。

式(5)等式两边对n^2求导，得到小面阵总暗电流随面阵规模的变化率：

$$\frac{\mathrm{d}I_{n\times n}}{\mathrm{d}n^2} = \left(I_i + 4C_{\mathrm{bias}}\right) + \frac{2}{n}\left(C_{\mathrm{zero}} - C_{\mathrm{bias}}\right), \quad (12)$$

其中，$I_i + C_{\mathrm{bias}}$与$C_{\mathrm{zero}} - C_{\mathrm{bias}}$均为正值，因系数$2/n$的存在，随面阵规模增大，$\mathrm{d}I_{n\times n}/\mathrm{d}n^2$数值减小。因此，小面阵器件总暗电流的增加趋势随面阵规模的增大而变缓，式(12)即该现象的理论解释。面阵规模足够大时，总暗电流的变化趋势将趋于线性增加，其斜率为：

$$\lim_{n^2\to\infty} \frac{\mathrm{d}I_{n\times n}}{\mathrm{d}n^2} = I_i + 4C_{\mathrm{bias}} . \quad (13)$$

3 结论

本文制备了不同规模的5 μm中心距小面阵器件，通过研究其暗电流规律，构造像元耦合作用的数学模型，引入矩阵方程描述邻近像元的暗电流贡献，并通过最小二乘法进行矩阵方程的参数求解，定量分析了反向偏置条件下相邻像元间的相互耦合强度。偏压-0.1 V条件下暗电流数据的分析结果显示，面阵像元独立存在时的本底暗电流为12.158 fA；反偏状态像元对最近邻反偏状态像元的

表5 *P/A*比测试结构器件各光敏元尺寸

Table 5 Size of each pixel of *P/A* test structure device

	1	2	3	4	5	6	7
光敏元尺寸/μm²	300×300	200×200	150×150	120×120	100×100	50×50	30×30

暗电流起抑制作用,抑制程度为本底暗电流的21.39%;而零偏状态像元对处于反偏状态最近邻像元的暗电流起增幅作用,增幅程度可达本底暗电流的219.42%。

本文基于小规模面阵器件的暗电流研究,建立了一套暗电流拟合分析方法。这一方法不仅适用于小规模面阵器件,还可以推广应用于大规模高密度焦平面的暗电流分析,为高密度InGaAs焦平面探测器的暗电流研究提供了新的思路。耦合模型参数与材料参数、暗电流物理机理的联系也可进一步进行探究。

References

[1] LI Xue, GONG Hai-Mei, SHAO Xiu-Mei, et al. Recent advances in short wavelength infrared InGaAs focal plane arrays [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2022, 41(1): 129-138.
(李雪, 龚海梅, 邵秀梅, 等. 短波红外InGaAs焦平面研究进展[J]. 红外与毫米波学报), 2022, 41(1): 129-138.

[2] MacDougal M, Mak C, Meitzner J, et al. Small pixel SWIR imagers using InGaAs and CQDs [C]. Infrared Technology and Applications L. SPIE, 2024, 13046: 84-90.

[3] Manda S, Matsumoto R, Saito S, et al. High-definition visible-SWIR InGaAs image sensor using Cu-Cu bonding of III-V to silicon wafer [C]. 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). IEEE, 2019: 16.7.1-16.7.4.

[4] https://attolloengineering. com/wp-content/uploads/2024/04/XM000018-Datasheet-Phoenix-VGA-SWIR-Imager.pdf.

[5] https://attolloengineering. com/wp-content/uploads/2024/03/XM000017-Datasheet-Phoenix-HD-SWIR-Imager.pdf.

[6] https://www. sony-semicon. com/files/62/flyer_industry/IMX990_991_992_993_Flyer_en.pdf.

[7] Tillement J, Cervera C, Baylet J, et al. Design and Characterization of 5 μm Pitch InGaAs Photodiodes Using In Situ Doping and Shallow Mesa Architecture for SWIR Sensing [J]. Sensors, 2023, 23(22): 9219.

[8] YU Chun-Lei, GONG Hai-Mei, LI Xue, et al. 2560×2048 short-wave infrared InGaAs focal plane detector (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(3): 20210941.
(于春蕾, 龚海梅, 李雪, 等. 2560×2048元短波红InGaAs焦平面探测器(特邀)[J]. 红外与激光工程), 2022, 51(3): 20210941.

[9] Deng H, Tang H, Li T, et al. The temperature-dependent photoresponse uniformity of an InGaAs subpixels infrared detector by the LBIC technique [J]. Semiconductor Science and Technology, 2012, 27(11): 115018.

[10] Wang W, Deng Z, Li X, et al. Dark current investigation in individual planar $In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP detector and fine pixel-pitch array with spacing variations [J]. Results in Optics, 2021, 5: 100181.

[11] Dolas M H, Atesal O, Caliskan M D, et al. Low dark current diffusion limited planar type InGaAs photodetectors [C]. Infrared Sensors, Devices, and Applications IX. SPIE, 2019, 11129: 91-96.

[12] Yuan H, Meixell M, Zhang J, et al. Low dark current small pixel large format InGaAs 2D photodetector array development at Teledyne Judson Technologies [C]. Infrared Technology and Applications XXXVIII. SPIE, 2012, 8353: 108-115.

[13] SHI Ming, SHAO Xiu-Mei, TANG Heng-Jing, et al. ICPCVD passivation of n on p structure deep mesa extended wavelength InGaAs photodetectors [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2016, 35(1): 47-51.
(石铭, 邵秀梅, 唐恒敬, 等. n-on-p结构深台面延伸波长InGaAs探测器的ICPCVD钝化工艺[J]. 红外与毫米波学报), 2016, 35(1): 47-51.

[14] Strang G. Linear algebra and learning from data [M]. Wellesley-Cambridge Press, 2019.