

## 中波碲镉汞雪崩光电二极管的增益特性

李雄军, 韩福忠, 李立华, 李东升, 胡彦博, 杨登泉, 杨超伟,  
孔金丞, 舒恂, 庄继胜, 赵俊\*  
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:**采用不同工艺制备了中波碲镉汞(HgCdTe)雪崩二极管(APD)器件,利用不同方法对其结特性和增益随偏压变化关系进行了表征,并基于 Beck 模型和肖克莱解析式进行了拟合分析.结果表明,不同工艺制备的 APD 器件饱和耗尽区宽度分别为 1.2  $\mu\text{m}$  和 2.5  $\mu\text{m}$ ,较宽的耗尽层有效抑制了高反偏下器件的隧道电流,器件有效增益则从近 100 提高至 1000 以上.用肖克莱解析式拟合 HgCdTe APD 器件增益-偏压曲线,获得了较好的效果.拟合结果与 Sofradir 公司的 J. Rothman 的报道相似.

**关键词:**中波碲镉汞;雪崩光电二极管;增益;C-V  
**中图分类号:**TN215 **文献标识码:**A

## Gain characteristics of MW HgCdTe avalanche photodiodes

LI Xiong-Jun, HAN Fu-Zhong, LI Li-Hua, LI Dong-Sheng, HU Yan-Bo, YANG Deng-Quan,  
YANG Chao-Wei, KONG Jin-Cheng, SHU Xun, ZHUANG Ji-Sheng, ZHAO Jun\*  
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** The midium wave (MW) HgCdTe avalanche photodiodes (HgCdTe APDs) were prepared by two different processes. The pn junction characteristics and the relation between gain and bias voltage for HgCdTe APDs were characterized by two different methods. The gain-bias curves of APDs were fitted based on the Beck model and Shockley's analytical expression. The results show that the widths of the saturated depletion region for APDs fabricated by two different processes are 1.2  $\mu\text{m}$  and 2.5  $\mu\text{m}$  respectively. The wide depletion region effectively suppresses the tunneling current at high reverse bias. The effective gain of the device increases from nearly 100 to over 1000. Shockley's analytical expression gives an excellent fit to the gain-bias curves of HgCdTe APDs, and the fitting parameters are similar to the results of J. Rothman at Sofradir.

**Key words:** midium wave (MW) HgCdTe, avalanche photodiode, gain, C-V  
**PACS:** 07.57.Kp, 78.55.Et, 85.60.Gz

### 引言

单载流子雪崩倍增和与历程相关的增益机制使碲镉汞雪崩二极管(HgCdTe APD)具有独特的雪崩倍增过程,可获得近无过剩噪声(过噪因子  $F \sim 1$ )的增益特性,使得器件信噪比几乎不发生衰退. HgCdTe APD 器件在较小的偏压下便可达到高的雪崩增益,且

响应时间与增益大小无关可获得很高的增益带宽乘积(GBW).因此,与电子和空穴均参与倍增过程导致较大的过剩噪声( $F_{\text{Si}}: 2 \sim 3; F_{\text{III-V}}: 4 \sim 5$ ),且要求高偏压工作的 Si APD 器件和 III-V 族 APD 器件相比, HgCdTe APD 器件具有显著的优势<sup>[1-3]</sup>.

高增益、低噪声以及快响应等特点使得 HgCdTe APD 器件特别适用于诸如主/被动双模成像、3D 成

收稿日期:2018-05-27,修回日期:2018-12-20

Received date: 2018-05-27, revised date: 2018-12-20

基金项目:兵器集团军品开发项目(JA2016231),联合实验室基金(2017HC020)

Foundation items: Supported by Military Product Development Project for CNGC(JA2016231), Joint Laboratory Fund(2017HC020)

作者简介(Biography): 李雄军(1984-),男,云南大理人,博士,高级工程师,主要从事红外探测器材料与器件的研究

E-mail: lixiongjun666@126.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: junzhao80@163.com

像以及光子计数成像等低光通量和高速应用. 因此, 国际上各主要红外探测器研发团队基于各自的技术基础开展了相关的研究工作, 并取得了很大的进展. DRS 的 Beck 等<sup>[3-5]</sup>人首次验证了 HgCdTe APD 器件具有高达 1000 的雪崩增益和低至  $\sim 1$  的过噪因子, 并于 2007 年<sup>[6]</sup>研制了  $40\ \mu\text{m}$  中心距,  $128 \times 128$  阵列规模的 HgCdTe APD 焦平面探测器. Selex 的 Baker 等<sup>[7]</sup>人研制了中心距为  $24\ \mu\text{m}$ , 规模为  $320 \times 256$  的 HgCdTe APD 焦平面, 器件增益高达 100, 且具有较低的过剩噪声, 并首次报道了激光门控成像演示验证. 随后他们还实现了主/被动双模成像和 3D 成像演示验证<sup>[8]</sup>, 其中距离分辨率为 1 m. Sofradir 的 Rothman 等<sup>[2,9-11]</sup>人获得了雪崩增益超过 10000 的 APD 单元器件, 研制了  $30\ \mu\text{m}$  中心距,  $320 \times 256$  阵列规模的 HgCdTe APD 焦平面探测器, 并实现了主/被动双模成像和 3D 成像, 实验室测试结果显示距离噪声为 11 cm; 此外, 还完成了中心距为  $15\ \mu\text{m}$ , 规模为  $384 \times 288$  的 HgCdTe APD 焦平面研制, 并进行了雪崩增益状态下被动热成像演示.

HgCdTe APD 器件雪崩增益作为重要的性能参数之一, 对器件性能具有重要的影响. 器件增益随偏压的变化关系与材料禁带宽度和器件结构有关. Beck 基于 DRS 大量 APD 器件实验数据提出了一个唯象的经验公式<sup>[3]</sup>, 随后 Kinch 在 Beck 经验公式基础上基于电子弹道输运提出了弹道模型 (ballistic model)<sup>[12]</sup>, 并指出和解释了部分 APD 器件增益特性与 Beck 经验模型不符的现象. Rothman 等<sup>[13]</sup>采用 Beck 模型和弹道模型拟合 Sofradir 器件实验结果时出现了较大的偏差, 并指出电子在耗尽区的输运是非弹道 (nonballistic) 输运过程, 并在此基础上结合肖克莱表达式提出了与历程相关的碰撞电离理论 (History-Dependent Impact Ionization Theory).

2000 年以来, 国外在 HgCdTe APD 探测器研制技术和理论研究方面均取得了巨大的进展. 近年来, 国内的研究团队也开始关注到了该技术, 并对其发展动态进行了跟踪报道<sup>[14-16]</sup>, 但并未开展系统而深入的研究. 本文基于液相外延 (LPE) 生长的中波 HgCdTe 薄膜, 采用不同的制备工艺研制出了增益高于 1000 的高性能 HgCdTe APD 器件, 并利用相关雪崩增益模型对器件的增益特性进行了相应地拟合和分析.

## 1 实验

### 1.1 器件制备

实验所用的 HgCdTe 材料为 LPE 生长的中波

HgCdTe 薄膜, 材料 Cd 组分  $x \sim 0.31$ , 导电类型为 P 型, 空穴浓度为  $3.0 \sim 6.0 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ . 采用成结和成结后退火处理工艺在 P 型 HgCdTe 表面制备  $\text{N}^+$  区, 与此同时在  $\text{N}^+$  区和 P 区之间形成了  $\text{N}^-$  区, 其厚度为  $1 \sim 3\ \mu\text{m}$ , APD 器件结构如图 1 所示.

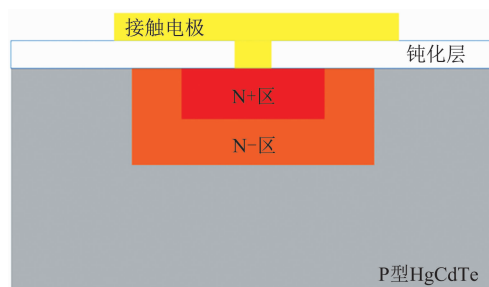


图 1 HgCdTe APD 器件结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of HgCdTe APD device

采用不同的成结和退火处理工艺分别制备了编号为 16M297M4 和 17M232M3 的 HgCdTe APD 实验芯片, 其上排布着一系列不同光敏面积的单元器件. 器件制备完成后, 将实验芯片与对应的互连引出结构经过 In 缩球、倒装焊及回流等倒装焊接工艺实现器件测试电极的引出, 形成 HgCdTe APD 测试芯片, 如图 2 所示.

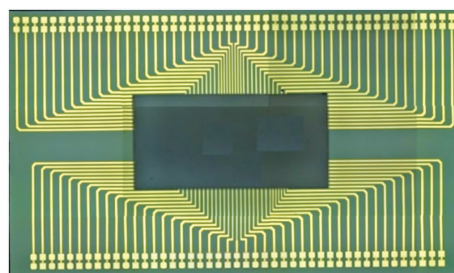


图 2 倒装互连后的 HgCdTe APD 测试芯片照片  
Fig. 2 The photograph of HgCdTe APD test chip after flip-chip interconnection

### 1.2 器件测试

将 HgCdTe APD 测试芯片载入低温探针台系统, 抽真空至约  $10^{-3}$  Torr, 然后通过液氮制冷到约 77 K. 待温度平衡后, 采用 Agilent 4284 半导体阻抗分析仪对 APD 器件进行 C-V 测试; 采用 Agilent 4155C 半导体参数分析仪分别在低背景、中背景及高背景不同辐射条件下对 APD 器件进行 I-V 测试.

然后, 再将 APD 测试芯片封装入中测杜瓦, 液氮制冷到约 77 K 后采用法国 HGH 公司生产的 BIRD210 型器件测试系统对 APD 器件进行了光谱

响应测试. 最后,在带斩波器的 500 K 黑体照射下,通过调节前置放大器给 APD 器件施加不同的偏压,并利用锁相放大器采集器件在不同偏置下的输出信号.

## 2 结果与讨论

### 2.1 器件光谱响应

图 3 为采用不同工艺制备的 HgCdTe APD 测试芯片上光敏面积为  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$  的 APD 单元器件在 77 K 温度下的归一化光谱响应特性. 编号为 16M297M4 和 17M232M3 测试芯片后截止波长分别为  $4.61\ \mu\text{m}$  和  $4.92\ \mu\text{m}$ .

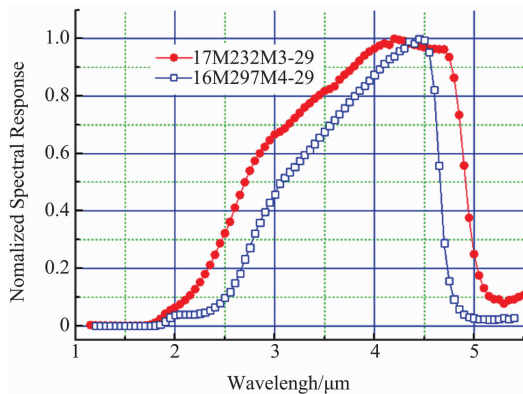


图 3 77 K 下 HgCdTe APD 器件归一化光谱响应  
Fig. 3 The normalized spectral response of HgCdTe APD under 77 K

### 2.2 不同辐射背景下器件 $I$ - $V$ 特性

图 4 为 HgCdTe APD 器件分别在低背景、中背景和高背景辐射条件下的  $I$ - $V$  特性. 较高偏置电压下,器件电流随偏压指数增加,且在相同偏压下 APD 器件电流随背景辐射强度呈比例地增大,表明器件存在内部增益,即雪崩增益. 其中,如图 4(a) 所示 16M297M4-29 在高于  $-8\ \text{V}$  反偏,器件电流随偏压关系开始偏离指数增加的斜率而呈现出明显增大的现象;17M232M3-29 器件电流则在大于  $-12.5\ \text{V}$  高反偏下仍未出现显著偏离指数增大的关系,如图 4(b) 所示.

根据 APD 器件雪崩增益

$$M(V) = \frac{I_{\text{Photo}}(V)}{I_{\text{Photo}}(V=0)}$$

$$= \frac{I_{\text{Illuminated}}(V) - I_{\text{Dark}}(V)}{I_{\text{Illuminated}}(V=0) - I_{\text{Dark}}(V=0)} \approx \frac{I(V)}{I_{\text{CC}}}$$

, (1)

其中,  $I_{\text{CC}}$  为器件短路电流. 利用低背景下器件电流

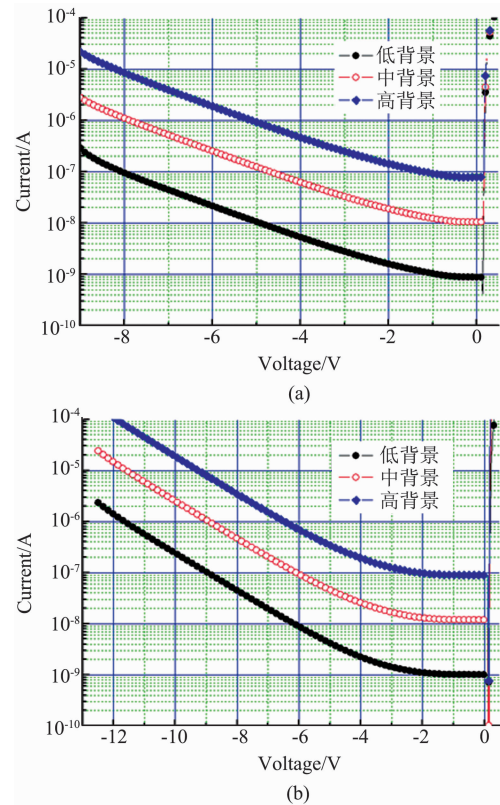


图 4 HgCdTe APD 器件在不同辐射背景下的  $I$ - $V$  特性  
(a) 16M297M4-29, (b) 17M232M3-29

Fig. 4  $I$ - $V$  characteristics of HgCdTe APD under different radiation backgrounds (a) 16M297M4-29, and (b) 17M232M3-29

随偏压关系,计算得到了器件增益随偏压的变化关系. 如图 5 所示,16M297M4-29 器件阈值电压(增益为 2 时所对应的器件偏压,用  $V_{\text{th}}$  表示)约为  $-2.1\ \text{V}$ ,雪崩增益在  $-8\ \text{V}$  反偏下为 100,偏压进一步增大,器件增益明显偏离指数增加的斜率;编号 17M232M3 的 APD 测试芯片上三个光敏面积均为  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$  的单元器件雪崩增益随偏压呈指数增大,且增益-偏压曲线呈现出较佳的一致性,仅在高于  $-12.5\ \text{V}$  反偏下出现了较小的离散,器件  $V_{\text{th}}$  为  $-3.9\ \text{V}$ ,在  $-12.5\ \text{V}$  高反偏下器件增益大于 2000.

基于 APD 器件  $C$ - $V$  测试结果,利用式(2)可计算得到器件耗尽区宽度随偏压的变化关系.

$$W(V) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot A_j}{C(V)} \quad , \quad (2)$$

其中  $W(V)$  为器件耗尽区宽度,  $A_j$  为结面积,  $C(V)$  为器件结电容,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $\varepsilon$  为 HgCdTe 介电常数.

如图 6 所示,APD 器件耗尽区宽度随反偏增加而增大并逐渐趋于饱和. 17M232M3 -29 器件耗尽区

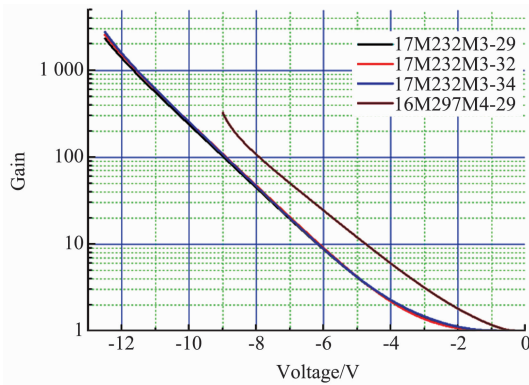


图5 77 K 下不同的 HgCdTe APD 器件增益随偏压变化关系

Fig. 5 Gain as a function of the bias of different HgCdTe APD devices at 77 K

宽度较 16M297M4-29 更宽,相应地阈值电压对应的饱和耗尽区宽度  $W_0$  分别为  $2.5 \mu\text{m}$  和  $1.2 \mu\text{m}$ 。再结合这两个 APD 器件的电流和增益随偏压的变化关系可以得出,16M297M4-29 器件由于耗尽区宽度较窄,相同偏压下结电场较高,因此相应的器件增益更高。但是同时器件隧穿电流也更大,故导致高反偏下器件电流和增益出现偏离指数关系地突然增加,并将影响器件有效增益。耗尽区宽度较宽的 17M232M3-29 器件虽然在较低偏压下增益较小,但由于有效抑制了隧穿电流使得器件可以在高的反偏下工作从而获得较高的雪崩增益。

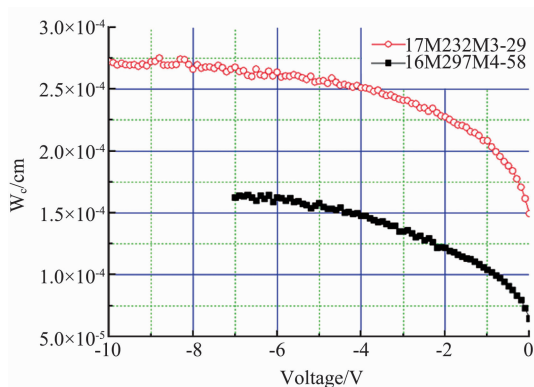


图6 77 K 下基于 C-V 测试估算的 HgCdTe APD 器件耗尽区宽度随偏压变化关系

Fig. 6 Depletion layer width in HgCdTe APDs estimated from C-V measurements as a function of the applied bias at 77 K

对于平面型 HgCdTe APD 器件<sup>[18-19]</sup>,在结区拐角处的电场强度通常较高,导致较大的带间隧道电流,且结区拐角的锐度对器件隧道电流具有重要影响。通过器件制备工艺的改进,17M232M3-29 器件

耗尽区宽度较 16M297M4-29 更宽的同时,pn 结结区拐角处的曲率半径更大,有效抑制了隧道电流,进而提高了器件反向偏压和雪崩增益。

此外,APD 器件有效工作偏压的提高还可能与 HgCdTe 薄膜材料质量有关。材料缺陷将在 HgCdTe 禁带中引入陷阱能级,在较高偏压下,较多的材料缺陷将导致器件陷阱辅助电流增大,甚至形成“导电通道”而使器件击穿。

### 2.3 不同偏压下器件响应信号

为了进一步验证 HgCdTe APD 器件雪崩增益效应,在带斩波器的 500 K 黑体照射下利用前置放大器和锁相放大器采集了 17M232M3-29 器件在 77 K 温度、280 Hz 斩波器频率下不同偏置的输出信号。如图 7 所示,器件响应信号随偏压呈指数增大。

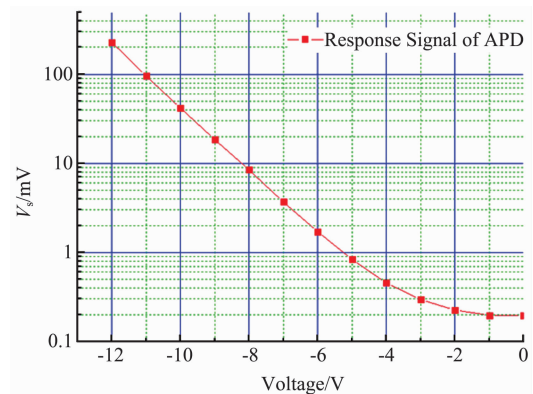


图7 77 K 下 HgCdTe APD 器件响应信号随偏压变化关系

Fig. 7 The response signal of HgCdTe APD as a function of applied bias at 77 K

此外,通过式(3)计算得到了器件不同偏压下的增益,并与 I-V 测试获得的器件增益-偏压曲线进行了比较,如图 8 所示。

$$M(V) = \frac{V_s(V)}{V_s(V=0)} \quad (3)$$

不同测试方式获得的器件增益随偏压变化关系曲线具有较佳的一致性,并进一步证实了雪崩倍增效应作为器件内部增益机制使得器件光电流信号得到有效放大。

### 2.4 碲镉汞 APD 器件增益特性

Beck 对 DRS 研制的 HgCdTe APD 器件相关测试数据近似拟合后得出了一个器件增益随偏压变化的唯象模型。

$$M(V) = 2^{\frac{V-V_{th}}{V_d}} + 1 \quad (4)$$

式中,  $V_{th}$  为阈值电压,对应雪崩效应开启的器件偏

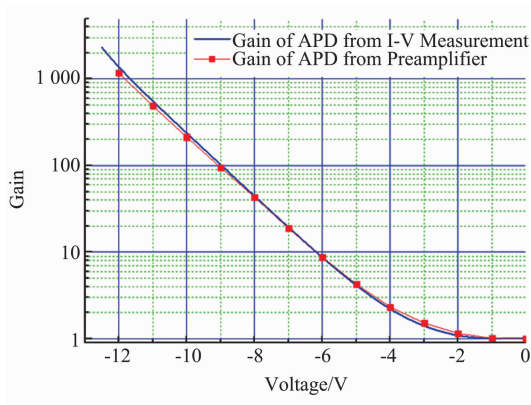


图8 不同测试方式获得的77 K下HgCdTe APD器件增益随偏压变化关系

Fig. 8 Gain of HgCdTe APDs as a function of the applied bias estimated from different measurements at 77 K

压; $V_d$ 为“死电压”,即雪崩效应开启后电子再次达到电离阈值能所要求的电压值.在Cd组分 $x = 0.2 \sim 0.5$ 范围内,器件 $V_{th} = 6.8E_g$ , $V_d = V_{th}/2$ . Kinch 基于HgCdTe的能带结构对Beck唯象模型给出了理论解释,并假定能量散射主要由耗尽层内与光学声子发射相关弹道运输(ballistic transport)主导.这就意味着声子能量散射与热电子能量无关,即

$$V_{th-eff} = V_{th} \cdot W/\lambda_e \quad (5)$$

式中, $\lambda_e$ 为光学声子平均自由程,对于中波HgCdTe器件, $\lambda_e \approx 2.2 \mu\text{m}$ .

采用Beck经验模型对16M297M4-29和17M232M3-29器件增益-偏压曲线进行拟合.如图9所示,在较高的偏压范围拟合结果较好,而在增益开启前则存在一定的偏差,特别是对于耗尽区较窄的器件,拟合偏差更大.表1为拟合获得的相关参数,并与Sofradir公司J. Rothman的结果进行了比较.

表1 基于Beck模型拟合得到的相关参数

Table 1 Parameters estimated from least-squares fitting of measured gain data using Beck's model

器件编号	$V_{th}/V$	$V_d/V$	$V_{th}/E_g/V$	$V_{th}/E_g/V$	$W_e/\mu\text{m}$	$V_{th}/W_e/(V/\mu\text{m})$
16M297M4-29	1.85	0.91	6.86	2.03	1.20	1.54
17M232M3-29	3.68	0.8	14.54	4.60	2.50	1.47
法国器件	1.46	0.85	5.42	1.72	0.77	1.90
	2.37	0.78	8.79	3.05	1.40	1.69
	3.53	0.74	13.09	4.80	2.40	1.47

如表1所示,对耗尽区宽度较窄的器件(16M297M4-29), $V_{th} = 6.86E_g$ , $V_{th}/V_d = 2.02$ ,与

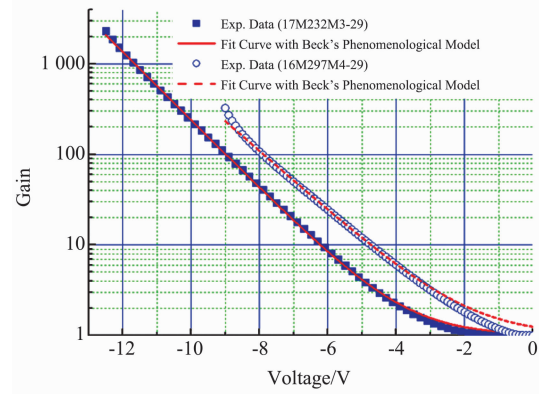


图9 基于Beck唯象模型拟合HgCdTe APD器件增益-偏压关系

Fig. 9 Fitting results of the gain-bias relation in HgCdTe APDs based on Beck's phenomenological model

DRS的结果较为相符;而耗尽区较宽的HgCdTe APD器件拟合结果和Rothman的相似,并与Beck模型存在较大的差异.首先, $V_d = V_{th}/2$ 关系式不成立;其次, $V_{th}$ 随饱和耗尽区宽度 $W_e$ 变化的比例系数较弹道光平均自由程小得多.这些偏差主要归咎于电子的非弹道运输.电子非弹道运输特性已在实验和蒙特卡洛模拟得到证实<sup>[17]</sup>.在较高电场作用下,实验结果和蒙特卡洛模拟表明由于弹性散射的增加导致电子饱和速度有所减小.弹性散射使在垂直于电场或与电场相反方向渡越的热电子形成较强的分布,使得 $\lambda_e$ 减小.HgCdTe APD器件 $V_{th}$ 和 $V_d$ 的比例系数存在差异,表明电子动力学行为是不同的.在较小电场下,电子动力学特征与 $V_{th}$ 相关;在高电场作用下则与 $V_d$ 有关.

Rothman等人利用肖克莱局域碰撞电离过程给出了一个增益解析模型:

$$M(V) = \exp\left[a(-V)\exp\left(-\frac{bW}{-V}\right)\right] \quad (6)$$

式中, $a$ 使得增益呈恒定的指数增加,且在高电场下与增益值无关;系数 $b$ 则限定了小偏压下雪崩增益开启过程随耗尽区宽度的变化关系.

如图10所示,采用肖克莱解析模型对器件增益-偏压关系进行拟合获得了很好的拟合效果.16M297M4-29器件在高的反向偏压下存在一定的偏差,这是因为该器件在高反偏下增益曲线的斜率主要由隧道电流决定,而不是器件的雪崩增益.

表2为基于肖克莱解析模型拟合得到的参数以及与Rothman的结果对比.可以清楚地看到,本文所研制的HgCdTe APD器件无论耗尽区宽窄,拟合获得的相关参数均与Rothman的结果相似,表明器件

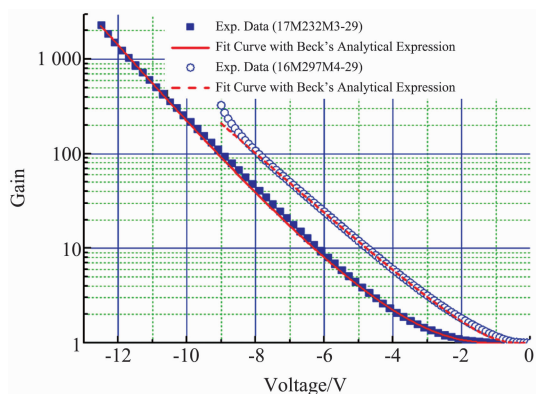


图 10 利用肖克莱解析模型拟合 HgCdTe APD 器件增益-偏压关系

Fig. 10 Fitting results of the gain-bias relation in HgCdTe APDs based on Shockley's analytical model

技术水平已达到较佳的状态。

表 2 基于肖克莱解析模型拟合得到的相关参数

Table 2 Parameters estimated from least-squares fitting of measured gain data using Shockley's analytical model

器件编号	$a/V^{-1}$	$bW/V$	$W_c$ / $\mu\text{m}$	$aE_g/q \approx$ $E_g/rE_r$	$b = bW/W_c$ /(V/cm)
16M297 M4-29	0.75	2.1	1.20	0.20	$1.75 \times 10^4$
17M232 M3-29	1.05	6.63	2.50	0.26	$2.65 \times 10^4$
	0.75	1.16	0.77	0.20	$1.50 \times 10^4$
法国器件	0.86	2.80	1.40	0.23	$2.00 \times 10^4$
	1.06	5.86	2.40	0.28	$2.44 \times 10^4$

### 3 结论

本文基液相外延生长的中波 HgCdTe 薄膜材料,采用不同的工艺制备了 HgCdTe APD 器件.利用不同方式表征了 APD 器件的雪崩增益,并基于 C-V 测试研究了 APD 器件耗尽区宽度随偏压的变化关系.最后,采用 Beck 经验模型和 Rothman 的肖克莱表达式对 HgCdTe APD 器件增益-偏压关系进行了拟合分析,并与 Rothman 的结果进行了比较.结果表明,本文制备的 HgCdTe APD 器件耗尽区饱和宽度分别为  $1.2 \mu\text{m}$  和  $2.5 \mu\text{m}$ ;较宽的耗尽层有效抑制了器件在高反偏下的隧道电流,显著提高了器件的有效雪崩增益,即 APD 器件增益从近 100 提高至 1000 以上;基于 Beck 模型的拟合未获得较好的效果,而采用肖克莱表达式拟合器件增益随偏压变化曲线则获得了较好的效果,且得到拟合参数与 Rothman 的结果相似.对于不同模型拟合存在的差异,文

中基于电子的非弹道输运进行了解释.

### References

- [1] Singh A, Srivastav V, Pal R. HgCdTe avalanche photodiodes: A review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**: 1358 - 1370.
- [2] Rothman J, de Borniol E, Gravrand O, et al. HgCdTe APD- focal plane array development at DEFIR [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, **7834**: 783400-1-783400-1-8.
- [3] Kinch M A, Beck J D, Wan C F, et al. HgCdTe electron avalanche photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, **33**(6):630 - 639.
- [4] Beck J D, Wan C F, Kinch M A, et al. MWIR HgCdTe avalanche photodiodes [J]. *Proc. of SPIE*, 2001, **4454**:188 - 197.
- [5] Beck J D, Wan C F, Kinch M A, et al. The HgCdTe electron avalanche photodiode [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, **35**(6):1166 - 1173.
- [6] Beck J, Woodall M, Scritchfield R, et al. Gated IR imaging with 128x128 HgCdTe electron avalanche photodiode FPA [J]. *Proc. of SPIE*, 2007, **6542**: 654217-1- 654217-18.
- [7] Baker I, Duncan S, Copley J. A low noise, laser-gated imaging system for long range target identification [J]. *Proc. of SPIE*, 2004, **5406**:133 - 144.
- [8] Baker I, Owton D, Trundle K, et al. Advanced infrared detectors for mult imode active and passive imaging applications [J]. *Proc. of SPIE*, 2008, **69402**: 69402L-1-69402L-11.
- [9] de Borniol E, Guellec F, Rothman J, et al. HgCdTe-based APD focal plane array for 2D and 3D active imaging: first results on a  $320 \times 256$  with  $30 \mu\text{m}$  pitch demonstrator [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, **7660**:76603D-1- 76603D-9.
- [10] de Borniol E, Rothman J, Guellec F, et al. Active three-dimensional and thermal imaging with a  $30 \mu\text{m}$  pitch  $320 \times 256$  HgCdTe avalanche photodiode focal plane array [J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(6):061305-1- 061305-6.
- [11] Kerlain A, Bonnouvier G, Rubaldo L, et al. Performance of mid-wave infrared HgCdTe e-avalanche photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, **41**(10):2943 - 2948.
- [12] Kinch M A. A theoretical model for the hgcdte electron avalanche photodiode [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, **37**(9):1453 - 1459.
- [13] Rothman J, Mollard L, Gout S, et al. History-dependent impact ionization theory applied to HgCdTe e-APDs [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(8):1757 - 1768.
- [14] LIU Xing-Xin. Status of HgCdTe avalanche photodiode arrays [J]. *Laser&Infrared* (刘兴新. 碲镉汞雪崩光电二极管发展现状. 激光与红外), 2009, **39**(9):909 - 913.
- [15] WANG Yi-Feng, CHEN Jie, YU Lian-Jie, et al. Development of mercury cadmium telluride avalanche photodiodes [J]. *Infrared* (王忆锋, 陈洁, 余连杰, 等. 碲镉汞雪崩光电二极管的发展. 红外), 2011, **32**(10):1 - 11.
- [16] GU Ren-Jie, SHEN Chuan, WANG Wei-Qiang, et al. MBE growth HgCdTe avalanche photodiode based on PIN structure [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (顾仁杰, 沈川, 王伟强, 等. MBE 生长的 PIN 结构碲镉汞红外雪崩光电二极管. 红外与毫米波学报), 2013,

- 32**(2):136 – 140.
- [17] Bertazzi F, Moresco M, Penna M, *et al.* Full-band monte carlo simulation of HgCdTe APDs [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, **39**(7):912 – 917.
- [18] Qiu W C, Hu W D, Chen L, *et al.* Dark current transport and avalanche mechanism in HgCdTe electron-avalanche photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, **62**:1926 – 1931.
- [19] Li Q, He J L, Hu W D, *et al.* Influencing sources for dark current transport and avalanche mechanisms in planar and mesa HgCdTe p-i-n electron-avalanche photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, **65**: 572 – 576.