

高倍增低暗电流 AlInAsSb 四元 数字合金雪崩光电二极管

郑大农^{1,2}, 苏向斌^{1,2*}, 徐应强^{1,2}, 牛智川^{1,2}

(1. 中国科学院半导体研究所 超晶格国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学 材料学院与光电技术学院, 北京 101408)

摘要: 用分子束外延系统(MBE)生长高质量 GaSb 基 AlInAsSb 四元数字合金制作雪崩光电二极管(APD)。为了克服随机体材料生长方式发生的偏析现象, 采用迁移增强的数字合金生长方式, 其快门顺序为 AlSb, AlAs, AlSb, Sb, In, InAs, In, Sb。其高分辨率 X 射线衍射(HR-XRD)曲线显示出尖锐的卫星峰, 并显示出几乎完美的晶格匹配, 其原子力显微镜(AFM)图像上也可以观察到光滑的表面形貌。使用优化的数字合金生长方式, 制备了分离吸收、渐变、电荷和倍增(SAGCM)型的 AlInAsSb 数字合金 APD。在室温下, 器件在 95% 击穿时, 暗电流密度为 0.95 mA/cm², 击穿前最大稳定增益高达~100, 其器件的高性能显示出光电领域进一步发展的潜力。

关键词: 雪崩光电二极管; 分子束外延; AlInAsSb; 四元数字合金

中图分类号: O43 文献标识码: A

High gain and low dark current AlInAsSb avalanche photodiodes grown by quaternary digital alloys

ZHENG Da-Nong^{1,2}, SU Xiang-Bin^{1,2*}, XU Ying-Qiang^{1,2}, NIU Zhi-Chuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: avalanche photodiodes (APD) have been fabricated using high quality GaSb-based AlInAsSb quaternary digital alloy grown by molecular beam epitaxy (MBE). To overcome the tendency towards phase segregation of random alloy, a digital alloy technique with migration-enhanced epitaxy growth method was employed, using a shutter sequence of AlSb, AlAs, AlSb, Sb, In, InAs, In, Sb. The HR-XRD curve shows sharp satellite peaks and almost perfect lattice matching. The smooth surface morphology can also be observed on the AFM image. Using optimized digital alloy, AlInAsSb separate absorption, grading, charge, and multiplication (SAGCM) APD was grown and fabricated. At room temperature, the device showed high performance with low dark current density of 0.95 mA/cm² at 95% breakdown and maximum stable gain before breakdown as high as 100, showing the potential for further applications of optoelectronics.

Key words: avalanche photodiodes (APD), molecular beam epitaxy (MBE), AlInAsSb, quaternary digital alloys

PACS: 81.05.Ea, 85.60.Gz, 68.65.Cd

引言

在过去的五十年里, 雪崩光电二极管(APD)在通讯、军事以及科研领域有着广泛的应用, 特别是

在光通信^[1]、雷达传感^[2]、单光子探测^[3-4]中有着很高的需求。在光电器件领域的研究中, 人们对于生长新型三五族四元合金材料的兴趣日益浓厚^[5-6]。在这些材料中, AlInAsSb 四元合金材料由于具有可以

收稿日期: 2020-06-12, 修回日期: 2020-12-25

Received date: 2020-06-12, Revised date: 2020-12-25

基金项目: 国家基础研究计划(2018YFA0209104), 国家自然科学基金(61790582)

Foundation items: Supported by National Basic Research Program of China (2018YFA0209104), National Natural Science Foundation of China (61790582)

作者简介(Biography): 郑大农(1992-), 男, 湖北孝感人, 博士研究生, 研究领域为新型半导体材料和器件. E-mail: zdn@semi.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: (suxb@semi.ac.cn)

和 InP、InAs 和 GaSb 衬底晶格匹配、能带和异质结构带隙的灵活调节性等优点,在电子和光电器件领域引起了广泛研究^[7-8]。特别地,AllnAsSb 四元合金材料更适合应用于高速光电通信器件,如光接收器件 APD^[9]。AllnAsSb($x < 0.72$)四元材料,具有直接带隙的特性^[10],其光吸收长度比通常的光通信间接带隙材料硅短 5~10 倍^[11]。APD 的增益来源于碰撞电离,这是一个随机过程,会导致额外的散粒噪声,常用过噪声系数表征。APD 的过剩噪声系数随增益增加而增加,随电子电离系数与空穴电离系数的比值 k 减少而减少^[12]。目前,高性能 APD 器件的首选材料依然是 Si 材料,这归功于 Si 材料的低 k 值,其可以低至 0.02^[13]。但 Si 材料的截止波长为 1.1 μm ,无法满足光通讯波段 1300~1550 nm 巨大的需求,而对于工作在更高波长的 InGaAs/InP、InGaAs/InAlAs 材料,其较高的 k 值又制约了 APD 器件的噪声和带宽性能。根据 Min Ren 等人的最新的研究工作可知,AllnAsSb 四元合金材料具有很低的过噪声系数,其材料的 k 值可以低至 0.01,几乎可以比拟硅材料的 k 值,这意味着 APD 具有更高的工作带宽^[11,14]。

然而,AllnAsSb 四元合金材料的生长困难限制了其应用。当使用分子束外延系统(MBE)进行生长材料时,在混合的 As / Sb 四元材料体系中,极难控制生长的 V 族成分^[14]。由于 As / Sb 的束流较大,且 V 族原子的结合率在很大程度上取决于生长温度,因此,As / Sb 束流大小的轻微偏差或生长温度微小区别可能会大大增加应变失配。此外,AllnAsSb 四元合金材料使用随机体材料生长方式进行生长时,由于其具有较大的混溶隙,AllnAsSb 材料趋向于分离成不均匀的二元和三元化合物^[15-17]。尽管 MBE 系统的非平衡生长方式可以相对扩展混溶隙边界,但对于生长混溶隙区域内的合金材料的困难依然存在。为了解决这些材料生长的问题,Scott J. Maddox 等人采用数字合金生长方式来外延生长了混溶间隙内的 AllnAsSb 材料,其使用 AlSb, AlAs, AlSb, InSb, InAs, Sb 的快门序列^[10]。通过引入迁移增强型外延生长方式^[18-19]和中断外延生长法^[20],可以进一步提高材料生长的质量,通常将其用于超晶格材料的外延生长。

在本文中,采用迁移增强型的外延方法,在 GaSb 衬底上生长 AllnAsSb 四元数字合金。通过调节各种生长条件如生长温度、V / III 族束流比和快门序列,来实现最佳的样品生长参数。样品的表面

形貌表征通过原子力显微镜(AFM)、高分辨率 X 射线衍射(HRXRD)来实现,最终得到了高质量的 AllnAsSb 四元数字合金外延片。我们设计并制备了分离吸收、渐变、电荷、倍增层结构(SAGCM)的 APD 器件。器件结果显示出来较高的倍增因子和较低的暗电流水平,其性能验证了外延片材料的质量,显示了 AllnAsSb 四元合金材料在 APD 器件中的应用潜力。其最终的器件性能表现为室温下在 95% 击穿电压前,暗电流水平为 0.64 mA/cm²,倍增因子可以达到 100。

1 实验

1.1 AllnAsSb 四元数字合金的外延生长

所有样品均由 Veeco GEN II 固态源 MBE 系统生长的,其衬底采用 N 型掺杂的 GaSb:Te(001)衬底。在每次外延生长前,需要进行高温脱氧处理,以去除衬底表面的氧化物。然后在 540°C 下生长 GaSb 缓冲层,使脱氧后的衬底表面平滑。通过原位反射高能电子衍射(RHEED)进行监测衬底表面晶格的生长过程。为了准确选择外延生长温度,需要标定一个基准温度,采用 GaSb 衬底表面再构转变温度 T_c 作为基准温度,一般在 430°C 附近时会观察到 GaSb 衬底发生 $\times 5 \rightarrow \times 3$ 的再构衍射条纹的转变。此外,RHEED 振荡也用于确定铝、镓或铟的生长速度,以获得我们所需生长速度的源炉温度。为了获得最佳的生长参数如生长温度和 V / III 族束流比,需要对外延样品的质量进行表征,使用光学显微镜用于估计表面缺陷,使用 AFM 用于确定表面形貌,用 HRXRD 进行扫描测量以获得外延晶体晶格失配度、合金成分并检查晶体质量。

对于 AllnAsSb 四元合金而言,除了分子束外延常规的生长温度、V / III 族束流比和生长速度外,还需考虑一个周期内二元化合物的组成、快门顺序和周期厚度等生长条件。由于 AlAs 和 InSb 材料与 GaSb 衬底的晶格失配度高达 ~7%,且缺少了 AlAs 或 InSb 时 AllnAsSb 四元合金不可能和 GaSb 衬底晶格匹配,因此只能减少一个周期内 AlAs 和 InSb 材料的厚度,或将他们作为界面层存在。据报道,InSb 界面相比于 AlAs 界面更平坦且点缺陷更少^[21-22],因此,选择生长 InSb 界面。为了增加外延生长的可控性,尽可能地减少界面互混,相邻的生长层化合物应该有共有原子。综合以上考虑,采用 MEE 法外延生长 InSb 界面,设计了如图 1 所示的快门控制顺序。

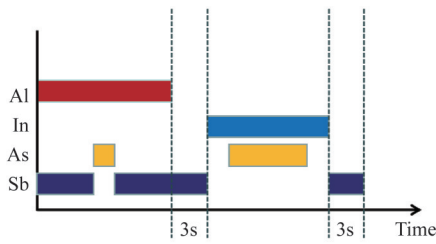


图1 MEE法生长AlInAsSb数字合金的快门顺序
Fig. 1 Shutter sequences in a period of AlInAsSb digital alloy lattice-matched to GaSb for MEE growth method.

在数字合金生长的一个周期内,每一种二元化合物的厚度都需要小于临界厚度,避免由于大晶格失配导致弛豫。一个周期生长10个原子层厚度(10MLs)的材料,其厚度约为几纳米,其中既考虑了电子、空穴波函数在多个周期内交叠的厚度上限^[10],也考虑了分子束外延快门控制的精度极限。对于作为APD吸收区的 $\text{Al}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{AsSb}$ 、作为APD倍增区 $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{AsSb}$ 以及作为APD渐变区的AlInAsSb(其组分 x 介于0.4~0.7),都可以推导出相对应一个周期内每种二元化合物的厚度。根据Vegard定律和每个二元化合物的晶格常数,可以计算出与GaSb衬底晶格匹配的四元合金 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 的 x, y 关系,即

$$y = \frac{0.3439x - 0.3835}{-0.0530 - 0.4211} \quad (1)$$

因此,在固定两个InSb界面均为0.35MLs和AlAs两侧AlSb厚度相等的情况下,可以计算出一个周期内每种二元化合物的厚度,其计算结果在表1中列出。

表1 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 数字合金一个周期内各二元合金的厚度

Table 1 Thickness of each layer in a period of $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ digital alloy

x	AlSb/ ML	AlAs/ ML	AlSb/ ML	InSb/ML	InAs/ML	InSb/ML
0.4	1.87	0.26	1.87	0.35	5.30	0.35
0.5	2.29	0.43	2.28	0.35	4.30	0.35
0.6	2.70	0.61	2.69	0.35	3.30	0.35
0.7	3.09	0.82	3.09	0.35	2.30	0.35

1.2 APD器件结构设计和制备

基于优化的AlInAsSb四元数字合金的生长条件,进行了APD器件的外延生长和工艺制备。APD器件的外延结构采用通常使用的SAGCM型结构^[14],对其中的电荷层掺杂和厚度进行了设计和优

化。最终生长和制备的如图所示AlInAsSb数字合金SAGCM型APD器件,其器件结构如图2所示。

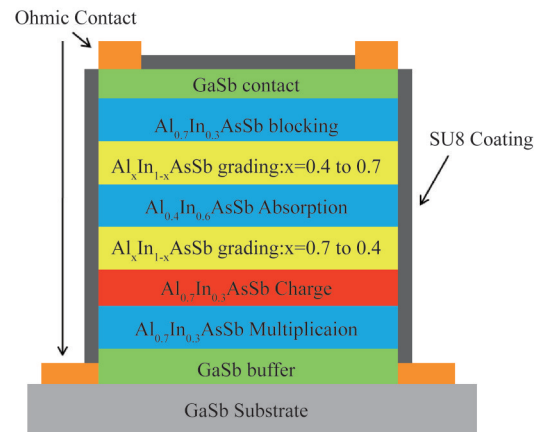


图2 AlInAsSb数字合金SAGCM型APD的结构图
Fig. 2 Schematic cross section of AlInAsSb DA SAGCM APD

表2 AlInAsSb数字合金SAGCM型APD的外延结构图
Table 2 Epitaxial structure of AlInAsSb DA SAGCM APD

厚度/nm	外延层材料	掺杂浓度 /cm ⁻³
50	GaSb(Be) p contact	$p = 1.00 \times 10^{19}$
100	$\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{AsSb DA (Be) p}$	$p = 2 \times 10^{18}$
50	$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb DA grading}$	UID(非故意掺杂)
1 000	$\text{Al}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{AsSb DA absorption}$	UID
50	$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb DA grading}$	UID
100	$\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{AsSb DA (Be) charge}$	$p = 1.5 \times 10^{17}$
500	$\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{AsSb DA multiplication}$	UID
500	GaSb(Te) n	$n = 1 \times 10^{18}$

表2显示的是AlInAsSb数字合金SAGCM型APD的外延结构图,表格详细地表示了APD器件每个外延层的厚度和电荷掺杂浓度。从上往下,AlInAsSb数字合金SAGCM型APD器件的外延结构分别是较薄的P型重掺杂的GaSb欧姆接触层,P型掺杂的 $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{AsSb}$ 包层,非故意掺杂的 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ 渐变层,非故意掺杂的 $\text{Al}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{AsSb}$ 吸收层,非故意掺杂的 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ 渐变层,P型掺杂的 $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{AsSb}$ 电荷层,非故意掺杂的 $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{AsSb}$ 倍增层,P型重掺杂的 $\text{Al}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{AsSb}$ 包层,n型重掺杂的GaSb欧姆接触层。对于电荷层厚度和掺杂浓度的选择,其可以调控APD器件内部的场强分布,使APD器件在反向偏置电压工作时,电场层的强电场可以实现碰撞电离,同时在吸收层产生低电场以帮助光电子漂流

且避免产生隧穿电流。

通过使用标准光刻和 N_2/Cl_2 电感耦合等离子体干法刻蚀 (ICP) 来形成 APD 器件圆形台面。为了降低表面泄漏电流,我们使用 SU-8 胶对台面侧壁进行钝化,其对侧壁的悬挂键有很好地填充作用^[23]。使用电子束蒸发用于沉积金属电极 (Ti (500 Å)/Pt (500 Å)/Au (3000 Å)),将金属触点沉积到台面的顶端和底部,形成良好的欧姆接触。

2 结果讨论与分析

2.1 AllnAsSb 四元数字合金的材料质量表征

通过优化 AllnAsSb 数字合金外延生长参数如生长温度、V / III 族束流比等,我们最终得到高质量的 AllnAsSb 数字合金材料。对倍增层材料 $Al_{0.7}In_{0.3}AsSb$ 、吸收层材料 $Al_{0.4}In_{0.6}AsSb$ 和渐变层材料 $Al_xIn_{1-x}AsSb$ 分别进行 HRXRD 和 AFM 的质量表征,其结果见图 3-5。由图可以看出,其 HRXRD 曲线显示出尖锐的卫星峰, GaSb 衬底峰和合金材料零级峰几乎重合,显示出几乎完美的晶格匹配,较窄的半高宽 (FWHM) 证明了外延片优异的晶体质量和均匀性。在 AFM 图像上可以观察到光滑的表面形貌,其表面形貌的起伏度 (RMS) 都在 2 Å 以下,显示了晶体良好的生长质量。

2.2 APD 器件的性能表征

图 6(a) 显示了在室温下 AllnAsSb 数字合金 SAGCM 型 APD 的一个 200 μm 直径的台面单元其暗电流-电压特性、光电流-电压特性及其对应的倍增因子与反向偏置电压之间的关系。光电流的测试条件为 0.01 mW 1550 nm 波长光直接照射。图 6(b) 表示的是其台面单元在室温下测量的电容-电压曲线。由图 6(b) 中典型的电容台阶状突变表明 APD 器件单元的穿通电压约为 20 V,此时器件内部电场已经耗尽了电荷层,并进入了吸收层。由图 6(a) 中的暗电流-电压曲线可知器件击穿电压约为 46 V。由图 6(a) 中的倍增因子-电压曲线可得,器件在击穿前获得的稳定增益为 100,其增益水平和以前报道的工作相当^[11,14,17]。在器件 95% 击穿电压时,其暗电流密度可以计算的 0.95 mA/cm²,其暗电流水平优于以前的工作^[14,17],表明器件采用的 SU-8 胶钝化处理大大减少了表面暗电流。对于 1 550 nm 波长的光 0.01 mW 的光功率,可以计算得到器件的响应度约为 0.2 A / W,相应的其外部量子效率 (EQE) 则为 16%。

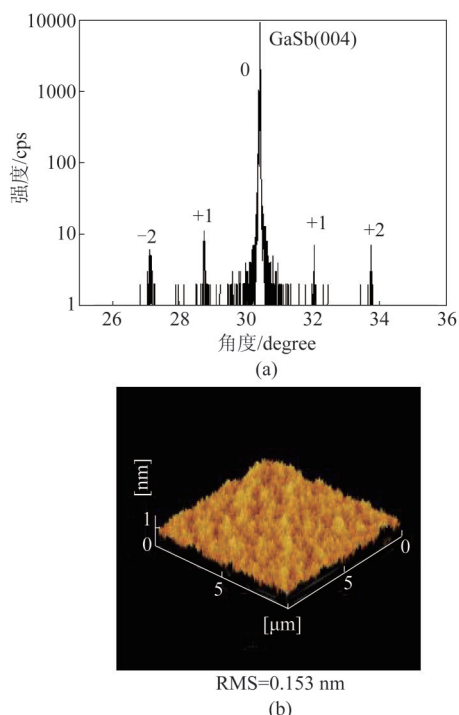


图 3 (a) $Al_{0.7}In_{0.3}AsSb$ 数字合金测试片的 HRXRD 图, (b) $Al_{0.7}In_{0.3}AsSb$ 数字合金测试片的 AFM 图

Fig. 3 (a) HRXRD of $Al_{0.7}In_{0.3}AsSb$ DA layer, (b) AFM of $Al_{0.7}In_{0.3}AsSb$ DA layer

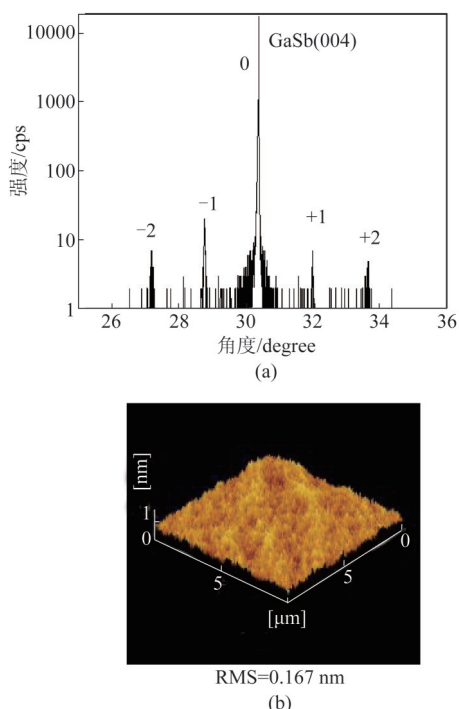


图 4 (a) $Al_{0.4}In_{0.6}AsSb$ 数字合金测试片的 HRXRD 图, (b) $Al_{0.4}In_{0.6}AsSb$ 数字合金测试片的 AFM 图

Fig. 4 (a) HRXRD of $Al_{0.4}In_{0.6}AsSb$ DA layer, (b) AFM of $Al_{0.4}In_{0.6}AsSb$ DA layer

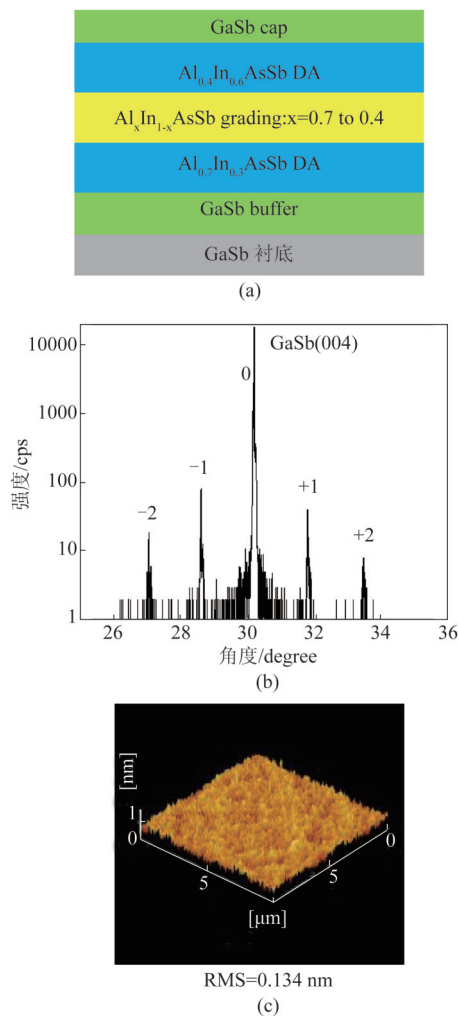


图5 (a) $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ 数字合金渐变层测试片的外延结构, (b) $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ 数字合金渐变层的 HRXRD 图, (c) $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ 数字合金渐变层的 AFM 图

Fig. 4 (a) Epitaxial structure of $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ DA grading layer, (b) HRXRD of $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ DA grading layer, (c) AFM of $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ DA grading layer

可以使用抗反射涂层进一步改善器件的外量子效率 EQE。器件的优异性能反映了 AlInAsSb 数字合金材料的生长质量良好,其在 APD 领域有重要的应用潜力。

3 结论

通过采用迁移增强型的外延方法,使用分子束外延系统在 GaSb 衬底上外延生长晶格匹配的 AlInAsSb 四元数字合金。为了克服随机材料生长方法中发生的偏析现象,引入了迁移增强的数字合金生长方法,该生长方法被证明是具有重复性且可以得到质量良好的单相晶体。该方法的快门顺序设

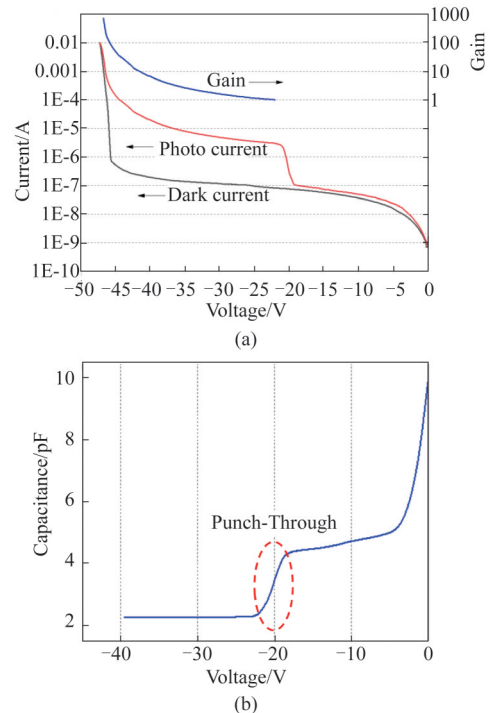


图6 (a) AlInAsSb 数字合金 SAGCM 型 APD 在室温下一个 $200\ \mu\text{m}$ 直径单元的暗电流、光电流、倍增因子随反向偏置的变化曲线, (b) AlInAsSb 数字合金 SAGCM 型 APD 在室温下一个 $200\ \mu\text{m}$ 直径单元的测量电容随反向偏置电压的变化曲线

Fig. 6 (a) Dark current, photocurrent, multiplication factor versus reverse bias of a $200\ \mu\text{m}$ -diameter AlInAsSb DA SAGCM APD at room temperature, (b) measured capacitance versus bias of a typical $200\ \mu\text{m}$ -diameter AlInAsSb DA SAGCM APD at room temperature

计为 AlSb , AlAs , AlSb , Sb , In , InAs , In , Sb 。使用该优化的 AlInAsSb 数字合金生长方法,制备出高倍增低暗电流的 SAGCM 型 APD。在室温下,器件在击穿前获得的稳定倍增高达 100, 95% 击穿电压时暗电流水平在 $0.95\ \text{mA}/\text{cm}^2$, 显示出 AlInAsSb 数字合金 SAGCM 型 APD 在光电领域应用的潜力。

致谢: This work was supported by the National Basic Research Program of China 2018YFA0209104, the Major Program of the National Natural Science Foundation of China under grant numbers: 61790582.

References

- [1] Campbell J C. *Advances in photodetectors*, in *Optical Fiber Telecommunications, Vol. 5, Part A: Components and Subsystems* [M]. Academic Press 5th Edition, 2008.
- [2] Bertone N, Clark W R. APD ARRAYS – Avalanche photo-

- diode arrays provide versatility in ultrasensitive applications [J]. *Laser Focus World*, 2007, **43**(9): 69–73.
- [3] Tosi A, Calandri N, Sanzaro M, *et al.* Low-noise, low-jitter, high detection efficiency InGaAs/InP single-photon avalanche diode [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2014, **20**(6), 3803406.
- [4] Jiang X, Itzler M, O'Donnell K, *et al.* InP-based single-photon detectors and Geiger-mode APD arrays for quantum communications applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2015, **21**(3) 3800112.
- [5] Semenov A N, Solov'ev V A, Meltser B Y, *et al.* Molecular beam epitaxy of AlInAsSb alloys near the miscibility gap boundary [J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, **278**(1–4):203–208.
- [6] Washington-Stokes D, Hogan T P, Chow P C, *et al.* Al_xIn_{1-x}As_{1-y}Sb_y/GaSb effective mass superlattices grown by molecular beam epitaxy [J]. *J. Cryst. Growth*, 1999, **201–202**: 854–857.
- [7] Slocum M, Forbes D V, Hillier G C, *et al.* Development of InAlAsSb growth by MOVPE [J]. *J. Cryst. Growth*, 2017, **471**:15–20.
- [8] Tournet J, Rouillard Y, Tournié E. Growth and characterization of AlInAsSb layers lattice-matched to GaSb [J]. *J. Cryst. Growth*, 2017, **477**:72–76.
- [9] Chang J R, Su Y K, Jaw D H, *et al.* Metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) growth and characterization of AlInAsSb and AlInAsSb/InGaAs multiple-quantum-well structures [J]. *J. Cryst. Growth*, 1999, **203**(4):481–485.
- [10] Maddox S J, March S D, Bank S R, *et al.* Broadly tunable AlInAsSb digital alloys grown on GaSb [J]. *J. Cryst. Growth De.*, 2016, **16**(7):3582–3586.
- [11] Woodson M E, Ren M, Maddox S J, *et al.* Low-noise AlInAsSb avalanche photodiode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, **108**:081102.
- [12] McIntyre R J. Multiplication noise in uniform avalanche photodiodes [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.* 1966, **13**(1): 164–168.
- [13] Campbell J C, Demiguel S, Feng M, *et al.* Recent advances in avalanche photodiodes [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2004, **10**(4):777–787.
- [14] Ren M, Maddox S J, Woodson M E, *et al.* AlInAsSb separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodiodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, **108**(19): 191108.
- [15] Rojas-Ramirez J S, Wang S, Contreras-Guerrero R, *et al.* Al_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} alloys lattice matched to InAs(100) grown by molecular beam epitaxy [J]. *J. Cryst. Growth*, 2015, **425**:33–38.
- [16] Vaughn L G. Mid-infrared multiple quantum well lasers using digitally-grown aluminum indium arsenic antimonide barriers and strained indium arsenic antimonide wells [D]. The University of New Mexico, 2006.
- [17] Lyu Y X, Han X, Sun Y Y, *et al.* Digitally grown AlInAsSb for high gain separate absorption, grading, charge, and multiplication avalanche photodiodes [J]. *J. Cryst. Growth*, 2018, **482**:70–74.
- [18] Waterman J R, Shanabrook B V, Wagner R J, *et al.* The effect of interface bond type on the structural and optical properties of GaSb/InAs superlattices [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**(1S):S106–S111.
- [19] Sullivan G J, Ikhlassi A, Bergman J, *et al.* Molecular beam epitaxy growth of high quantum efficiency InAs/GaSb superlattice detectors [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2005, **23**(3):1144–1148.
- [20] Rodriguez J B, Christol P, Cerutti L, *et al.* MBE growth and characterization of type-II InAs/GaSb superlattices for mid-infrared detection [J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, **274**(1–2):6–13.
- [21] Bennett B R, Shanabrook B V, Glaser E R. Interface control in InAs/AlSb superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(5):598–600.
- [22] Tuttle G, Kroemer H, English J G. Effects of interface layer sequencing on the transport properties of InAs/AlSb quantum wells: Evidence for antisite donors at the InAs/AlSb interface [J]. *J. Applied Physics*, 1990, **67**(6):3032–3037.
- [23] Mata A, Fleischman A J, Roy S. Fabrication of multi-layer SU-8 microstructures [J]. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2006, **16**(2):276.