

In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As 雪崩光电二极管的数值模拟研究

李慧梅, 胡晓斌, 白霖, 李晓敏, 于海龙, 徐云, 宋国峰

(中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室, 北京 100083)

摘要: 建立了 SACM 型 In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As 雪崩光电二极管 (APD) 的分析模型, 通过数值研究和理论分析设计出高性能的 In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As APD。器件设计中, 一方面添加了 In_{0.52}Al_{0.48}As 势垒层来阻挡接触层的少数载流子的扩散, 进而减小暗电流的产生; 另一方面, 雪崩倍增区采用双层掺杂结构设计, 优化了器件倍增区的电场梯度分布。最后, 利用 ATLAS 软件较系统地研究并分析了雪崩倍增层、电荷层以及吸收层的掺杂水平和厚度对器件电场分布、击穿电压、IV 特性和直流增益的影响。优化后 APD 的单位增益可以达到 0.9 A/W, 在工作电压 (0.9 Vb) 下增益为 23.4, 工作暗电流也仅是纳安级别 (@0.9 Vb)。由于 In_{0.52}Al_{0.48}As 材料的电子与空穴的碰撞离化率比 InP 材料的差异更大, 因此器件的噪声因子也较低。

关键词: 雪崩光电二极管 (APD); SACM 结构; 暗电流; 增益; 图像应用

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0520005

Numerical simulation study on In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As avalanche photodiode

Li Huimei, Hu Xiaobin, Bai Lin, Li Xiaomin, Yu Hailong, Xu Yun, Song Guofeng

(Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: An analytical modeling of In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As avalanche photodiode (APD) was proposed with In_{0.52}Al_{0.48}As charge layer between the absorption and multiplication region (SACM). Numerical study and theoretical analysis were performed to design a high performance In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As APD. An In_{0.52}Al_{0.48}As barrier layer was adopted to block minority carriers originated from contact regions in our APD. Simultaneously, double-doped multiplication layer was used to improve the electric field gradient change of the multiplication region and reduce the dark current. In addition, the influence of different doping level and different thickness of every layer on the energy band, the electric field distribution, breakdown voltage and current-voltage characteristics were also investigated by using device simulation software ATLAS from SILVACO international. The photodetector exhibits a high responsivity of 0.9 A/W at the unity gain. The gain is 23.4 at the operating voltage (0.9 Vb). Furthermore, the dark current is only in the nano-ampere orders of magnitude at 0.9 Vb.

Key words: avalanche photodiode (APD); SACM structure; dark current; gain; imaging application

收稿日期: 2015-09-21; 修订日期: 2015-10-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2011CBA00608, 2012CB619203, 2015CB351902, 2015CB932402);

国家科技重大专项计划 (2011ZX01015-001); 国家自然科学基金 (61036010, 61177070, 11374295, U1431231)

作者简介: 李慧梅 (1991-), 女, 硕士生, 主要从事雪崩光电二极管的设计和制备方面的研究。Email: lihuimei@semi.ac.cn

导师简介: 宋国峰 (1965-), 男, 研究员, 主要从事激光器与光电探测器的理论及研发方面的研究。Email: sgf@semi.ac.cn

0 引言

雪崩光电二极管在许多微弱光探测领域具有广阔的应用前景,如军用和民用等。相比于 PIN 探测器,APD 是一种具有内部光电流增益的半导体光电子器件,它应用光生载流子在耗尽层内的碰撞电离效应而获得光电流的雪崩倍增。光通讯应用中^[1],APD 作为光接收机的探测器时,光接收机的灵敏度不再受外部放大器的热噪声限制,提高了光接收机的信噪比,从而降低整个通信系统的成本。除此之外,在军事上,中心带雪崩光电二极管的 In_{0.53}Ga_{0.47}As PIN 四象限探测器^[2]可同时用于人眼安全激光测距、激光定位和跟踪。工作在 Geiger 模式的 APD,可对单个光子进行探测,在生物光子学、医学影像、量子成像以及加密系统等方面取得广泛的应用。集成的焦平面阵列探测器 APDs 可实现实时三维成像^[3],通过极短的采样时间或者脉冲照明,获得目标区域的三维成像,对于高速运动目标的探测具有重要价值。

对于不同应用领域,信噪比和成像质量均是系统的关键性能参数。因此,获得低电流密度和低倍增噪声是两个至关重要的问题。最早用于红外探测的是基于 InP 和 In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料的 APD,其中 InP 为倍增区材料,In_{0.53}Ga_{0.47}As 为吸收区材料。近几年,为了提高器件的整体性能,获得低过剩噪声的 APD,学者们对雪崩倍增区设计做出了一定的改进。一方面,将 InP 倍增区替换为 In_{0.52}Al_{0.48}As 材料^[4];另一方面,减小器件倍增区的厚度^[5],在倍增区比较薄的情况下,借助于弛豫空间效应的影响,使得器件的碰撞电离过程随机性减弱,可以获得较低的过剩噪声。目前,与国外发展水平相比,在三维成像技术等相关研究方面还存在较大的差距。设计高性能 In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As APD 仍需进一步展开研究。

文中利用 ATLAS 软件设计了高性能的 In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As APD。所设计的 APD 结构引入 100 nm In_{0.52}Al_{0.48}As 势垒层阻挡了 P 型接触层的少数载流子向倍增区的扩散;另外,为了获得较高的增益以及较低的暗电流特性,采用了薄的双层掺杂的倍增区结构。通过精确控制 APD 不同层的厚度和掺杂浓度,可以获得较低暗电流密度、低过剩噪声因子和高的增益带宽乘积。

1 理论和仿真

APD 的实际性能基本上取决于器件内部的电场分布,所以合理控制器件内部的电场分布是至关重要的。首先,控制器件内部电场可以控制光生载流子的输运速度,提高响应速度,使器件增益特性实现最大化。其次,在吸收区设计过程中,需适度的电场强度来抑制吸收区的隧道电流。最后,建立合理的内部电场分布可以控制不必要的噪声,降低器件的暗电流。因此,对器件内部电场分布的优化是文中工作的一部分。

理想情况下,光吸收仅发生在吸收区,碰撞电离过程仅发生在倍增区域。根据泊松方程和边界条件,在反偏压 V 情况下,器件内部的电场分布函数如公式(1)所示。

$$E(x, V_r) = E_m(V_r) - \frac{qN_m W_m}{\epsilon_0 \epsilon_m} - \frac{qN_c W_c}{\epsilon_0 \epsilon_c} - \frac{qN_g(x - W_m - W_c)}{\epsilon_0 \epsilon_a} \quad (1)$$

(W_m+W_c ≤ x ≤ W_m+W_c+W_a)

式中:q 为电子电量;ε₀ 为真空介电常数;N_m,N_c 分别为倍增层、电荷层的掺杂浓度;W_m,W_c,W_a 为倍增层、电荷层、吸收层的宽度;相对介电常数分别为 ε_m,ε_c,ε_a。

根据公式(1),可以获得在不同工作电压和不同结构参数条件下的电场分布,这一理论公式的推导对后续的数值模拟仿真提供了理论指导。

1.1 结构参数及模型参数

所设计的器件结构如表 1 所示:在 InP 衬底上

表 1 APD 外延层结构示意图

Tab.1 Epitaxial structure of APD

Material	Layer	Concentration/cm ⁻³	Thickness/nm	Doping type	Dopings
In _{0.53} Ga _{0.47} As	Contact	9×10 ¹⁸	20	P+	Be
In _{0.52} Al _{0.48} As	Barrier	9×10 ¹⁸	100	P+	Be
In _{0.52} Al _{0.48} As	Window	7×10 ¹⁸	700	P+	Be
In _{0.52} Al _{0.48} As	Spacer	Intrinsic	50	i	-
In _{0.53} Ga _{0.47} As	absorber	Intrinsic	1500	i	-
In _{0.52} Al _{0.48} As	Spacer	Intrinsic	50	i	-
In _{0.52} Al _{0.48} As	Charge	3×10 ¹⁷	120	P+	Be
In _{0.52} Al _{0.48} As	Multiplication	2×10 ¹⁵	100	P-	Be
		1×10 ¹⁵	100	P-	Be
In _{0.52} Al _{0.48} As	Contact	5×10 ¹⁸	100	N+	Si
In _{0.52} Al _{0.48} As	Buffer	8×10 ¹⁸	500	N+	Si
InP	Substrate			SI	

先外延生长 500 nm 厚的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 缓冲层, 再生长 100 nm 厚的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 作为 N 型欧姆接触层; 在 N 型接触层上外延生长两层低掺杂的倍增层, 总厚度为 200 nm; 然后生长掺杂浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的电荷层来调节电场分布; 接着生长 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层, 为了扩宽耗尽区宽度以及平缓异质结的能带不连续, 在吸收层的两侧均生长了本征的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$; 最后再外延生长窗口层、势垒层和欧姆接触层。

由于 APD 结构的对称性, 可以认为是准一维的仿真。为了精确计算暗电流成分, 仿真过程中引入了俄歇、SRH 和光学复合等复合机制^[5]。电子和空穴的迁移率模型包含了浓度依赖的迁移率模型和平行电场依赖的迁移率模型, 低场迁移率模型^[6]见方程式(2)。正如前面所述, APD 器件内部的电场分布是非常重要的, 因为碰撞电离率随电场强度呈 e 指数依赖关系, 见公式(3)^[8]:

$$\mu(N, T) = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max}(300 \text{ K})(300 \text{ K}/T)^{\theta_1} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{\text{ref}}(300 \text{ K})(T/300 \text{ K})^{\theta_2}} \right)^{\lambda}} \quad (2)$$

$$\alpha(E), \beta(E) = A \exp \left[- \left(\frac{E_0}{E} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中: α 和 β 分别为电子和空穴的离化系数, 在计算中 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 和 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 的碰撞电离系数采用参考文献[8]的数据。

2 结果和讨论

为了获得最佳器件性能, 在反向偏压和光照情况下, 讨论并分析了不同层的厚度和掺杂浓度对器件的影响, 其中光源波长为 1 310 nm, 光入射功率为 0.01 W/cm^2 。

图 1 给出了电荷层掺杂浓度对器件暗电流(图 1(a))和增益特性(图 1(b))的影响, 电荷层厚度固定为 150 nm。

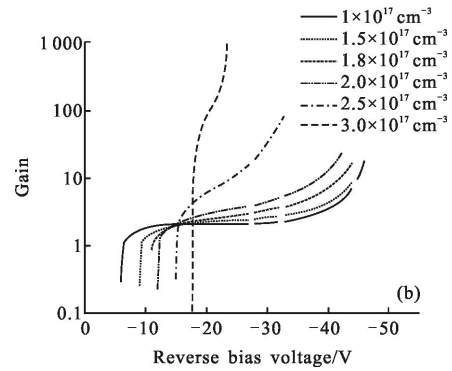
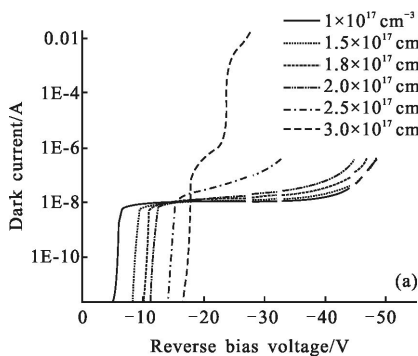


图 1 不同电荷层掺杂浓度对暗电流(a)和增益特性(b)的影响
Fig.1 Dark current (a) and gain characteristics (b) for different doping levels in the charge region

根据仿真结果, 可以看到电荷层的掺杂水平对器件性能的影响较大, 当电荷层掺杂浓度较低时, 吸收区载流子的漂移速度小, 而且雪崩倍增层的碰撞电离率也比较小, 从而导致整个器件的增益偏小; 当电荷层掺杂浓度偏高时, 严重的能带弯曲会引起不必要的带带隧穿电流, 使得器件的击穿电压偏低, 并且增益曲线比较陡峭。

为了进一步研究电荷层厚度以及掺杂浓度和器件击穿电压的关系, 总结了几组仿真数据如表 2 所

表 2 不同电荷层厚度和掺杂浓度下器件特性

Tab.2 Device characteristics of different thickness and doping of charge layer

No.	C-region thickness /nm	C-region doping /cm ⁻³	Breakdown /V	Gain (@0.9 Vb)	Dark current /nA@0.9 Vb
13#	150	1.8e17	46.8	9.65	24.9
12#	150	2e17	44.7	12.7	32.7
10#	80	4e17	40.9	15.9	41.3
3#	120	2.8e17	39.6	19.2	50.4
8#	100	3.5e17	36.8	21.6	57.1
11#	80	4.5e17	34.8	23	61.3
1#	120	3e17	35.3	23.4	62.5
14#	150	2.5e17	32.6	24.6	65.8
5#	100	3.8e17	31.2	27.6	75.4

示。通过分析表 2 中的数据, 可以得出如下结论: 一方面, 当电荷层的面电荷密度小于 $3.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层存在微小的碰撞电离会产生严重的不

良噪声,如图 2(a)所示;相反,当电荷层的面电荷密度大于 $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时,如图 2(b)所示,以 7# 的电场分布为例加以说明,可以看到, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层的电场偏小,此时部分载流子会堆积在 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 异质结处,并且在器件窗口层界面存在比较强的电场尖峰,容易引起器件的提前击穿,所以在实际设计中,应避免这种情况的发生。另一方面,随着电荷层的面电荷密度的增加,器件的击穿电压减小,而器件的增益(@0.9 Vb)呈增加趋势,在工作电压(0.9 Vb)下,暗电流也会随着电荷层面密度电荷的增加而增加。综合考虑,选择 120 nm 、掺杂浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 作为电荷层。

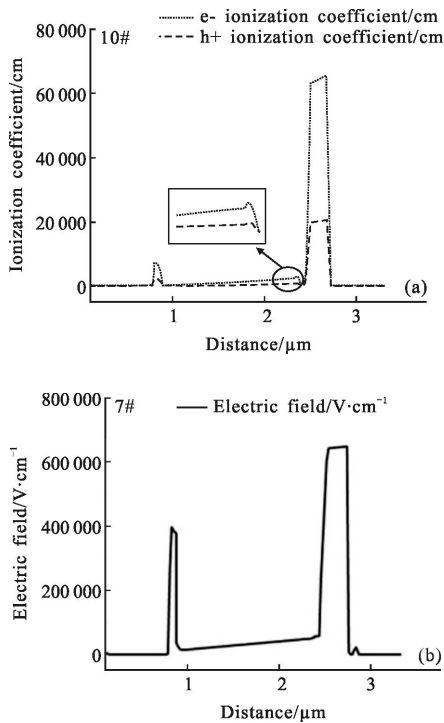


图 2 样品 10# 的碰撞电离分布图(a)和样品 7# 的电场分布图(b)
Fig.2 Impact ionization distribution in sample 10# (a) and electric field distribution in sample 7# (b)

APD 的增益倍增区对器件性能也起着重要作用,特别是对增益、倍增噪声和增益带宽乘积的性能的影响。图 3 给出了增益区厚度对电场分布的影响,可以看出,随着增益区厚度的减小,由于弛豫空间效应^[9]越来越显著,使得器件的最大电场强度有明显的提高,采用双层掺杂的倍增层,可以使增益区电场平坦化,如图(3)中的放大图所示,在相同的工作电压下,也可以获得较小的暗电流。

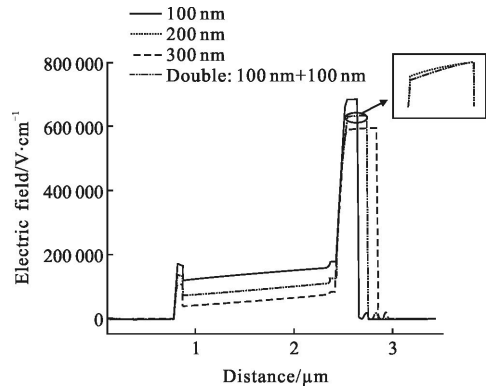


图 3 $W_m=100 \text{ nm}, 200 \text{ nm}, 300 \text{ nm}$, 双倍增层时的电场分布图
Fig.3 Electric field distribution for $W_m=100 \text{ nm}, 200 \text{ nm}, 300 \text{ nm}$, double layer

图 4 给出了器件的过剩噪声系数 $F(M)$ 与增益 M 的关系图,根据 McIntyre 提出的局部场理论^[10],过剩噪声系数 $F(M)$ 可以表示为:

$$F(M) = kM + \left[2 - \frac{1}{M} \right] (1-k) \quad (4)$$

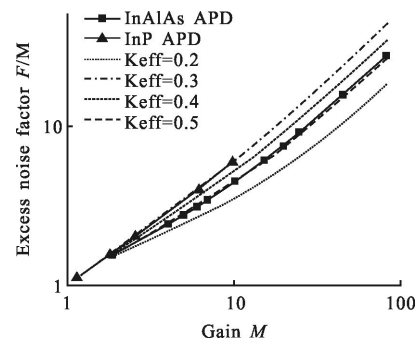


图 4 APD 的过剩噪声系数与增益的关系图
Fig.4 Excess noise factor versus gain for APD

可以看出,过剩噪声仅与增益 M 和空穴与电子碰撞电离系数之比 k 有关, $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ APD 器件的碰撞电离率之比 k 约等于 0.3,而 InP APD 器件的碰撞电离率之比约为 0.5~0.6,与参考文献[11]报道一致,所以采用 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料作为倍增区材料时,在纯电子注入的条件下,可以获得比 InP 更好的噪声特性。另一方面, $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料相比于 InP 的禁带宽度宽,在相同场强下可以减小隧道暗电流的产生,而且与 InP 衬底晶格匹配。另外, $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 由于是电子触发倍增,更容易制成掩埋 PN 结 APD,避免了表面强电场的产生,从而避免了制作复杂的保护环。器件的外量子效率主要受光吸收的影响,满足公式:

$$\eta_{\text{ext}}=(1-R)(1-e^{-\alpha d}) \quad (5)$$

为了得到较大的外量子效率,又不至于产生更大的暗电流,采用本征掺杂 1 500 nm $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为吸收区。而 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 对 1 310 nm 波长光吸收系数为 $1.16 \mu\text{m}^{-1}$, 所以理想情况下,外量子效率可以达到 82%。

3 结 论

根据理论分析和数值模拟研究,发现电荷层对器件性能起着决定性作用。通过采用 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 作为倍增区材料,采用掩埋的 PN 结结构,避免了表面强电场的产生,相比于 InP 材料可以获得更好的噪声特性。通过优化,器件得到较低的暗电流密度,其击穿电压为 35.3 V,在工作电压 0.9 Vb 下,增益仍可达到 23.4,单位增益响应度为 0.9 A/W,所以由此器件组成的三维焦平面可以应用到图像应用中。

在随后的工作中,根据上面的结构参数,将利用 MBE 制备多组 APD,通过比较数值模拟和实验的结果,进一步优化器件的性能。

参 考 文 献:

[1] Masahiro Nada, Haruki Yokoyama, Yoshifumi Muramoto, et al. 50-Gbit/s vertical illumination avalanche photodiode for 400-Gbit/s Ethernet systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (12): 14681-14687.

[2] Shi Zhu, He Wei, Qin Wenzhi, et al. Quadrant PIN photodetector integrated APD in the center on the basis of InGaAs heterostructure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (5): 824-829. (in Chinese)

石柱, 何伟, 覃文治, 等. 中心带雪崩光电二极管的 InGaAs PIN 四象限探测器 [J]. *红外与激光工程*, 2010, 39 (5): 824-829.

[3] Wang Fei. Research progress in focal plane array for real-

time laser three dimensional imaging [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 297-305. (in Chinese)

王飞. 实时激光三维成像焦平面阵列研究进展[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 297-305.

[4] Mohammad A Saleh, Majeed M Hayat, Paul P Sotirelis, et al. Impact-ionization and noise characteristics of thin III-V avalanche photodiodes [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(12): 2722-2731.

[5] Yuan P, Hansing C C, Anselm K A, et al. Impact ionization characteristics of III-V semiconductors for a wide range of multiplication region thickness [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2000, 36: 198-204.

[6] Dwivedi A D D, Mittal A, Agrawal A, et al. Analytical modeling and ATLAS simulation of $\text{N}^{+}\text{-InP}/\text{n}_{0}\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{p}^{+}\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ p-i-n photodetector for optical fiber communication [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53: 236-245.

[7] Sotoodeh M, Khalid A H, Rezazadeh A A. Empirical low-field mobility model for III-V compounds applicable in device simulation codes [J]. *J Appl Phys*, 2000, 87 (6): 2890-2900.

[8] Campbell J C, Tsang W T, Qua G J, et al. High-speed InP/InGaAsP/InGaAs Avalanche Photodiodes Grown by Chemical Beam Epitaxy [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1988, 24(3): 496-500.

[9] Joe C Campbell. Recent advances in telecommunications avalanche photodiodes [J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25 (1): 109-121.

[10] McIntyre R J. Multiplication noise in uniform avalanche diodes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1966, 13 (1): 164-168.

[11] Eiji Yagyu, Eitaro Ishimura, Masaharu Nakaji, et al. Design and characteristics of guardring-free planar InAlAs avalanche photodiodes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(8): 1011-1017.