

InGaAs/InP 雪崩光电探测器异质结结构优化分析

雷 玮, 郭方敏, 胡大鹏, 朱自强, 褚君浩

(华东师范大学信息学院极化材料与器件教育部重点实验室, 上海 200062)

摘要:根据一个吸收层、电荷层和倍增层分立结构(SACM)的 InGaAs/InP 雪崩光电探测器, 减薄电荷层的厚度而引入渐变层, 保持材料与厚度不变, 改进成吸收层、电荷层、过渡层与倍增层分立结构(SAGCM)的雪崩光电探测器, 优化了吸收层与倍增层间材料的异质结结构。采用 APSYS 软件对其能带结构、电场分布以及暗电流和 $1.55\mu\text{m}$ 的脉冲光响应电流、增益等进行仿真与计算。对比两种器件的性能, 结果分析表明, 改进后的器件获得更低的穿通值电压, 降低探测器在低偏压下的漏电流, 同时得到更大的增益。

关键词:雪崩光电探测器; SACM 结构; SAGCM 结构; 暗电流; 增益; APSYS

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Simulation and Optimizing for Heterostructure of InGaAs/InP Avalanche Photo-detectors

LEI Wei, GUO Fang-min, HU Da-peng, ZHU Zi-qiang, CHU Jun-hao

(Key Laboratory of the Ministry of Education Polarization Materials and Devices, College of Information Sciences and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: An InGaAs/InP avalanche photodetector (APD) with InGaAsP grade layer and InP charge layer between the InGaAs absorption and InP multiplication region (SAGCM-APD) was simulated. APSYS software was employed for the simulation of energy band, electric field, dark current and current plus response at the wavelength $1.55\mu\text{m}$. Results were compared with a sectional charge layer SACM-APD which has the same materials and device thickness. The simulations demonstrated that the heterostructure composed by grade layer and charge layer in SAGCM-APD could make lower leakage current at the lower reverse bias voltage relatively to SACM-APD. A lower punch-through voltage, breakdown voltage and the greater gain also obtained in SAGCM compared to SACM structure.

Key words: avalanche photo-detector; SACM; SAGCM; dark current; multiplication gain; APSYS

1 引言

高灵敏和宽带宽的光探测器在光通信波长在 $0.8 \sim 1.6\mu\text{m}$ 领域中应用非常重要。基于 InGaAsP/InP 材料体系的雪崩光电探测器 (APD) 和 PIN 探测器是在这些应用当中最为广泛的一类。曾有报道, PIN 光电探测器可以获得较高的响应度, 但相对于 APD 来说, 它不能提供内部增益^[1-2]。为了获得更高性能的 APD, 曾有提出过将吸收层和倍增层分开, 即 SAM-APD^[3] 可降低器件的暗电流, 也有提出将 APD 器件中的吸收层、渐变层、电荷层、倍增层

分立(SAGCM APD)^[4], 是由于 SAGCM 结构在吸收区与倍增区间引入薄的高浓度掺杂层作为电场控制层, 倍增区电场分布更为均匀, 也提供足够的电场差降, 确保倍增层发生倍增效应, 当单种载流子输运到倍增区域时, 在这种结构中倍增噪声得到降低, 其中渐变层的介入降低了 InGaAs 与 InP 材料禁带边上

基金项目:科技部重大项目 (No. 2006CB932802) 资助。

作者简介:雷 玮 (1982 -), 男, 在读硕士研究生, 主要从事半导体光电探测器研究。

收稿日期:2008-04-20; **修订日期:**2008-07-16

的累积效应。而今随着要求的提高和技术的日趋成熟,低击穿电压和倍增层的厚度是 APD 应用当中面临两个重要参考参数^[5-6]。

APD 的设计期望性能和制造实际性能,本质上取决于器件内部的电场强度和分布。本文从一个双电荷层的 SACM - APD 器件出发,减薄电荷层厚度并采用渐变层代替,而得到改进的 SAGCM - APD,优化 APD 器件中吸收层与倍增层之间的异质结结构,采用 APSYS 软件进行仿真,比较结果表明可以获得更低的穿通电压(punch through voltage),可以在低偏压下更好控制漏电流,同时也得到更大的增益。

2 SACM - APD 与 SAGCM - APD 的结构

2.1 SACM - APD 结构

图 1(a)是一个设计的 SACM 器件剖面结构^[7], N⁺型的 InP 衬底掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,接着生长 300nm 厚的 InP 缓冲层, N⁺ 掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 1000nm 厚的吸收层 In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料 N 型掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,而在吸收层和倍增层之间连续采用了两层的电荷层,分别为 InGaAsP 和 InP,厚度都是 70nm 掺杂浓度也一致是 N⁺型 $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,在倍增层与吸收层之间可以形成足够的电场差降,设计中为了得到较低击穿电压,倍增层的厚度为 500nm 的低掺杂($1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)的 N 型 InP 材料,最上层 1000nm 厚的接触层为 P⁺ 掺杂的 InP 材料,浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,上下的电极都是欧姆接触。

2.2 SAGCM - APD 结构

在本文中,我们对上述器件材料加以改进,保留 InP 电荷层,而将 InGaAsP 电荷层改成渐变层, P 组分在这层材料当中从 0 至 1 渐变,掺杂浓度为 N 型 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,其他的层材料保持厚度与掺杂浓度不变,如图 1(b)所示。

contact layer InP(P ⁺) 1000nm	contact layer InP(P ⁺) 1000nm
multiplicatin layer InP(N) 500nm	multiplicatin layer InP(N) 500nm
charge layer InP(N ⁺) 70nm	charge layer InP(N ⁺) 70nm
charge layer InGaAsP(N ⁺) 70nm	grade layer InGaAsP(N) 70nm
absorption layer InGaAs(N) 1000nm	absorption layer InGaAs(N) 1000nm
buffer layer InP(N ⁺) 300nm	buffer layer InP(N ⁺) 300nm
substrate InP(N ⁺)	substrate InP(N ⁺)
SACM - APD (a)	SAGCM - APD (b)

图 1 APD 器件结构剖面图
(a) SACM - APD (b) SAGCM - APD

3 APSYS 仿真与比较分析

平衡状态下的两个器件的部分结构能带情况如图 2 所示,能带结构显示,SAGCM 结构的 APD 的能带在 grade 层 InGaAsP 宽度要比 SACM 结构中 InGaAsP 层 charge 层能带宽^[8]。吸收层与倍增层之间的异质结对于 SAGCM APD 结构来说更有利于降低在低偏压下的暗电流,并在后面的分析当中陈述清楚。

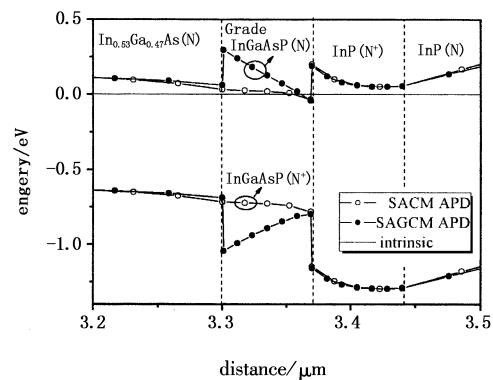


图 2 SACM - APD 与 SAGCM - APD 部分能带结构

3.1 暗电流的仿真对比

随着外加反向偏压的增加,在吸收层里面耗尽的宽度也随之增大,内建电场也会随着 P - N 结耗尽扩散以指数方式增长,高量子效率的获得需要使得吸收层耗尽^[9]。当外加偏压大于雪崩击穿电压的时候,InGaAs 吸收层吸收光子而产生的载流子在异质界面的电场作用下发生漂移,并被扫入倍增区继而发生倍增效应。

而在此同时,热激发的载流子同样因为电场作用下形成暗电流最主要的是产生复合电流(G - R Current)^[10]。而对于 InP 的非掺杂倍增区和低掺杂的 InGaAs 吸收区,空间电荷密度是很小的。因此,耗尽区主要向吸收区扩展,即使电场增大到能产生隧道效应,贯穿深度也是微米数量级,隧穿电流将是非常小。如图 3 所示,SAGCM 结构得到暗电流在穿通电压后迅速上升,与 SACM 结构在雪崩击穿后的暗电流相当,说明了暗电流主要来自热激发载流子形成的产生复合电流,其值与吸收层耗尽厚度有关,而在两种器件相同的 InGaAs 吸收层厚度,暗电流值也理应相当。在低偏压情况下(穿通电压之前)的 I - V 曲线中可以看到,SACM 结构有较大的漏电流。

根据底偏压下的产生复合电流方程^[11]:

$$I_{G-R} \cong (qn_iAW/\tau_{eff}) [1 - \exp(-qV_b/2kT)] \quad (1)$$

其中, q 是电子的电荷; k 是玻尔兹曼常数; n_i 为本征

载流子浓度; τ_{eff} 载流子的有效寿命而 W 耗尽层宽度; 对以直接而言, $W = [2k_s(V_b + V_{bi})qN_D]^{1/2}$, V_b 外加偏压, V_{bi} 内建电势, k_s 是电介质常数。

David P. McElroy 等人在研究中报道了温度对 APD 漏电流的影响^[12], 漏电流(主要是产生复合电流)可以由下式表示出来:

$$I_{\text{leakage}} = (T^{3/2})(e^{-E_g/2kT}) \quad (2)$$

从式(1)、式(2)中可以看出, 低偏压下的产生复合电流与耗尽层的厚度有很大关系, 同时与材料的禁带宽度有明显关系, 当禁带宽度变小时, 漏电流会明显地增加。结合图2中显示的材料禁带宽度可以看到 SAGCM 结构的禁带要较 SACM 宽, 这也说明了在低偏压下具有更低的漏电流的原因(雪崩击穿电压前), 说明使用渐变层对暗电流的控制起到了一定的作用。

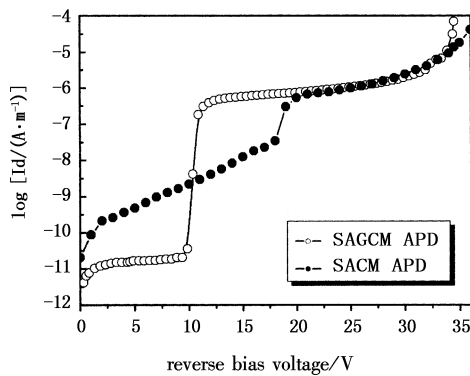


图3 SAGCM-APD 与 SACM-APD 暗电流比较

3.2 SAGCM-APD 电场分布

在 APD 器件研究中首先就会想到在电荷层里面的电离情况, 倍增区相邻的电荷层可以为其提供很高而且均匀的电场, 高电场也有利于增加电子和空穴的碰撞离化率(α), (β), 使碰撞离化率之比 α/β 增加。此外, 倍增区的高电场也会导致载流子运输距离和运输时间以及雪崩时间的减少。另外一个方面就是应该将电荷层的厚度减到足够薄, 这样就可以保证电荷层浓度为常数提高性能, 采用单层的薄电荷层将可以获得更低的穿通电压^[13]。图4是仿真 SAGCM 结构外加不同反偏下得到的电场分布情况。改进后的 70nm 高掺杂的电荷层, 在加反偏压后提供给倍增层均匀电场, 倍增区的电场大小随着电压的升高而增加, 在反偏为 10V 时电荷层刚好耗尽, 当反向偏压在 34.5V 时处于反向击穿电压附近, 这个时候倍增区的电场达到最大, 相对于图3中 SACM-APD 器件吸收层耗尽约为 15V 电压,

SAGCM 结构可以获得更低的穿通电压。

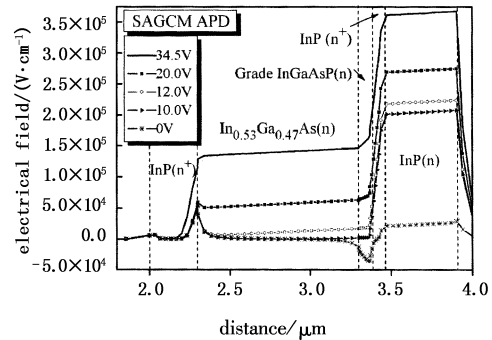


图4 SAGCM-APD 各反向偏压下电场分布

3.3 光脉冲响应与倍增因子计算比较

文献[14]对这种结构的时间响应载流子也做了较为明了的分析, 给出的计算模型为:

$$I_{ph}(t) = \frac{q}{W_t} [\nu_n(N_p(t) + N_s(t)) + \nu_p(P_p(t) + P_s(t))] \quad (3)$$

式中, $I_{ph}(t)$ 是时间响应光电流总和; W_t 是探测器的总厚度; ν_n, ν_p 分别是电子和空穴饱和漂移速率; $N_p(t), P_p(t)$ 分别是入射光首次激发电子、空穴数; $N_s(t), P_s(t)$ 是时间响应中二次光激发电子、空穴个数。在仿真中, 我们给 SAGCM 结构器件施加时间为 10ps 的脉冲光, 光强 10nW。图5是脉冲电流响应结果。从图中可以看到, 随着反向偏压的增加, 仿真得到的时间响应光电流增加, 而时间响应的脉冲电流峰值半高宽也增加, 即时间响应持续时间增加, 这与更高的反向偏压下二次光生载流子数目的急剧增加相关。从这里也可以反映出, 器件的增益随着反向偏压的升高非线性增加的。

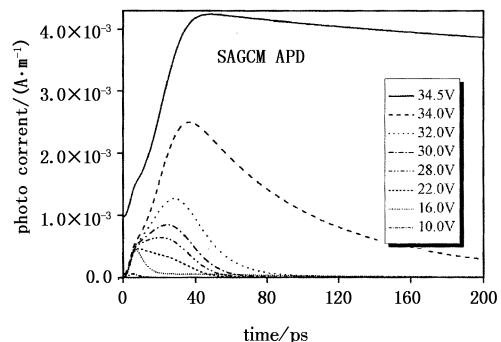


图5 SAGCM-APD 时间响应光电流不同反向偏压下的仿真值

雪崩增益(Gain)是衡量 APD 倍增能力的一个重要参数, 一般情况都是这么定义——吸收层产生的电子-空穴对数量与入射光子数之比值。从表面看来是一个恒定的值, 而实际上 APD 增益是一个平均值, 因为发生在器件内的碰撞离化是个随机的过

程因情况不同而涨落。采用仿真得到的脉冲光响应电流与响应时间关系结果计算出增益值:

$$\text{Gain} = (\text{电子空穴对}) / (\text{入射光子数}) \\ = (\text{总脉冲电流值}/q) / (\text{总脉冲光功率}/h\nu) \quad (4)$$

其中, (入射光子数) = (光功率) × (光脉冲高斯宽) / ($h\nu$); 而 (电子空穴对) = (整个响应时间的电流总值), $h\nu$ 单个光子的能量。

SAGCM 结构仿真得到的增益值, 在反向击穿电压前其增益可以达到 50, D. Haško 等人详细报道了该 SACM 结构下 APD 的光响应特性^[7], 并且其增益值最大为 10, 两者对比如图 6 所示。对比中明显可以看到通过 SACM 结构改进为 SAGCM 结构后增益得到了很大的提高。

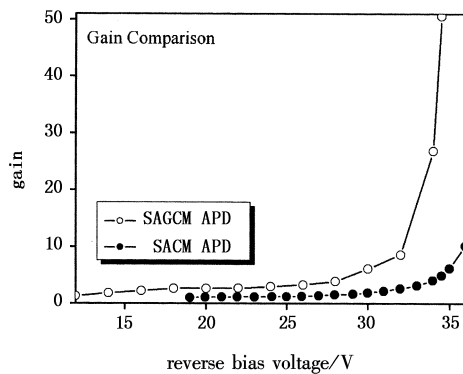


图 6 SAGCM - APD 与 SACM - APD 增益比较

4 结 论

采用 APSYS 软件对两个相同材料与尺寸的 InGaAs/InP SAGCM 结构与双电荷层的 SACM 结构 APD 器件进行了物理特性仿真, 并且对两者性能进行了对比。从直流特性和时间响应特性可以看出, 经过改进后的 SAGCM - APD 显示了更加优越的性能。采用单层电荷层的 SAGCM 结构器件可以获得更低的穿通电压, 通过过渡层结构可以降低低偏压下的暗电流, 更有利于低压工作环境, 并且从仿真理论中得到更加大的雪崩倍增值, 在接近击穿电压工作环境下, 增益可以达到 50, 远远大于同样材料的 SACM 结构的 APD 的增益值, 为提高器件工作性能提供了足够的理论依据, 对实际应用中的器件制作有一定的指导意义。

参考文献:

[1] Hyun K S, Park Ch Y, Lee E H. Gain characteristics of InP/InGaAs heterostructure avalanche photodiode [J]. Mater. Sci. Eng., 1998, 51(1): 106 - 109.
[2] Xiao Y C, Deen M J. Modeling of two-dimensional gain

profiles for InP/InGaAs avalanche photodiodes with a stochastic approach [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1999, 35(3): 1853 - 1862.

- [3] Nie H, Anselm K A, Hu C, Murtaza S S. High-speed resonant-cavity separate absorption and multiplication avalanche photodiodes with 130GHz gain-bandwidth product [J]. Appl. Phys. Lett., 1997, 70(1): 161 - 163.
[4] Haralson J N, Parks J W, Brennan K F. Numerical simulation of avalanche breakdown within InP-InGaAs SACM standoff avalanche photodiodes [J]. Lightwave Technol., 1997, 15(8): 2137 - 2140.
[5] Park Ch Y, Hyun K S, Kang S G. Effect of multiplication layer width on breakdown voltage in InP/InGaAs avalanche photodiode [J]. Appl. Phys. Lett., 1995, 67(11): 3789 - 3791.
[6] Watanabe I, Nakata T, Makita K. High-speed, high-reliability planar-structure superlattice avalanche photodiodes for 10Gb/s Optical receivers [J]. Lightwave Technol., 2000, 18(5): 2200 - 2207.
[7] Haško D, Kováč J, Uherek F. Avalanche photodiodes with sectional InGaAsP/InP charge layer [J]. Microelectronics Journal, 2006, 37(5): 483 - 486.
[8] Zhao Yan-li, He Su-xiang. Multiplication characteristics of InP/InGaAs avalanche photodiodes with a thicker charge layer [J]. Optics Communications, 2006, 265(3): 476 - 480.
[9] Liao Chang-jun, Wang Jin-dong, Lü Hua. Experimental characterization improving the design of InGaAs/InP APD for single photon detection [J]. Semiconductor Photonics and Technology, 2005, 11(3): S31 - S33.
[10] 郝国强, 张永刚, 刘天东. InGaAs PIN 光电探测器的暗电流特性研究 [J]. 半导体光电, 2004, 25(5): 341 - 345.
[11] Forrest S R, Leheny R F, Nahory R E. In_{0.53}Ga_{0.47}As photodiodes with dark current limited by generation-recombination and tunneling [J]. Appl. Phys. Lett., 1980, 37(3): 322 - 325.
[12] Virginia Ch Spanoudaki, David P McElroy, Irene Torres-Espallardo. Effect of temperature on the performance of proportional APD-based modules for Gamma ray detection in positron emission tomography [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(1): 469 - 480.
[13] Kyung-Sook Hyuna, Chan-Yong Park. Breakdown characteristics in InP/InGaAs avalanche photodiode with P-I-N multiplication layer structure [J]. J. Appl. Phys. 1997, 81(2): 974 - 984.
[14] Yasser M El-Batawy, Deen M Jamal. Analysis and circuit modeling of waveguide-separated absorption charge multiplication-avalanche photodetector [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(3): 335 - 344.