

一种新型结构的光电负阻器件

李 丹 李树荣 夏克军 郭维廉 郑云光

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 提出了一种新型结构的硅光电负阻器件——光电双耦合区晶体管(photoelectric dual coupled area transistor, PDUCAT), 它是由一个 P⁺N 结光电二极管和位于两侧的两个纵向 NPN 管构成的. 由于两个 NPN 管到光电二极管的距离不同, 使得它们对光生空穴电流的争抢能力随外加电压的变化产生差异, 同时两个 NPN 管电流放大系数相差较大, 最终导致器件负阻现象的出现. 文中对 PDUCAT 进行了工艺模拟和器件模拟, 围绕着负阻的形成机理和影响器件性能的主要参数进行了讨论, 初步建立了器件模型.

关键词: 光电器件; 负阻; 模拟; 晶体管

PACC: 7130 **EEACC:** 4250; 2560B; 2560Z

中图分类号: TN32 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2003)10-1078-06

1 引言

硅光电负阻器件(silicon photoelectric negative resistance devices, SPNRD)是一种同时兼有光敏特性和负阻特性的光电器件,可用于光控电流开关、光控脉冲振荡器和光电耦合器等方面^[1,2].但目前已研制出来的几种不同结构的光电负阻器件——光电表面负阻器件 PNEGIT^[3,4]和光电 λ 型双极晶体管 PLBT^[5],却分别存在着受器件表面特性影响较大、制作工艺较复杂以及负阻区特性不够理想等缺点.在此基础上,本文通过对负阻形成机理的研究,首次提出了一种新型结构的光电负阻器件——光电双耦合区晶体管(photoelectric dual coupled area transistor, PDUCAT),并对其进行了工艺模拟和器件模拟,从器件物理和数学的角度分析了负阻现象形成的原因,初步推导出电流-电压关系.该器件与其他的光电负阻器件相比具有如下特点:(1)具有在小电流下加速下降的电压控制型负阻特性;(2)负阻区的各电学参数可以比较容易地通过对器件结构参数的调节加以

控制;(3)器件制备工艺与双极晶体管兼容,制做成本低;(4)属于体内负阻器件,电学特性相对稳定.

2 PDUCAT 的设计

光电双耦合区晶体管采用如图 1(a)所示的结构.该结构中部 P₁ 区为面积较大的光电二极管,其两侧分别有纵向 N₂P₂N₁ 管和 N₃P₃N₁ 管;同时 P₁ 和 P₂ 区以及 P₁ 和 P₃ 区之间出现了两个寄生横向 P₁N₁P₂ 管和 P₁N₁P₃ 管;横向 PNP 管的基区又被称为耦合区,即光电二极管的光生电流通过该区传输给纵向 N₂P₂N₁ 和 N₃P₃N₁ 管基的区,形成基极注入电流.

该结构可采用普通的双极工艺制得,大体步骤如下:(1)先在浓度为 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 的 N 型硅片上经氧化、光刻和硼扩散工艺形成 P₁ 和 P₃ 区;(2)再在 N 型硅衬底上经光刻和硼扩散工艺形成 P₂ 区;(3)最后通过光刻和磷扩散工艺在 P 型基区内制作 N₂、N₃ 发射区.我们通过 SILVACO 软件进行工艺模拟,得到如图 1(b)所示的剖面杂质分布结构.

李 丹 女,1980 年出生,硕士研究生,从事半导体新型器件和 VLSI 研究.

李树荣 男,1946 年出生,教授,从事半导体新型器件和 VLSI 研究.

夏克军 男,1978 年出生,硕士研究生,从事半导体新型材料和器件物理研究.

2002-11-04 收到,2003-04-14 定稿

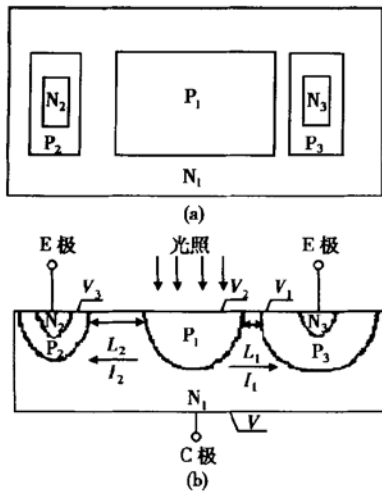


图 1 (a) PDU CAT 结构俯视图; (b) PDU CAT 结构剖面图

Fig. 1 (a) Planform of PDU CAT structure; (b) Profile of PDU CAT structure

由于 P_2 与 P_3 区扩散时间不同, 造成纵向 $N_2P_2N_1$ 管的基区宽度小于 $N_3P_3N_1$ 管的基区宽度, 其相应的电流放大系数大于 $N_3P_3N_1$ 管的电流放大系数. 另外, 我们有意识地设计横向 P_1 至 P_2 区的距离大于 P_1 至 P_3 区的距离, 致使具有大 β 值的 $N_2P_2N_1$ 管相对应的 $P_2N_1P_1$ 管的电流放大系数小于 $N_3P_3N_1$ 管相对应的 $P_3N_1P_1$ 管的电流放大系数, 造成了受光 P_1 区两侧诸方面特性的差异.

3 PDU CAT 的工作原理

对图 1 所示的 PDU CAT 进行器件模拟. 该器件在一定光功率的光源照射下, 得到如图 2 所示的集电极电流 I_C 随 V_{CE} 变化曲线. 在 V_{CE} 较小时, I_C 随 V_{CE} 的增大而增大; 当 V_{CE} 再增大时, I_C 随之减小; 当 V_{CE} 进一步增大时, I_C 减小至一最小电流. 我们把曲线分为正阻区、负阻区、谷值区和击穿区(未模拟击穿区)四个区域.

对 PDU CAT 输出特性的具体分析如下:

(1) 正阻区: 当 V_{CE} 较小时, 输出电流 I_C 随 V_{CE} 的增加而迅速增加. 这是因为: 在初始状态, 光照使 P_1N_1 结正偏, 由 P_1 区注入到 N_1 区的光生空穴电流 I_L 作为两侧 NPN 管的基极电流 I_B , 使处于饱和状态的 NPN 管与其相应端的 PNP 管同时退饱和, 引起了 I_C 随着 V_{CE} 的增加而迅速上升.

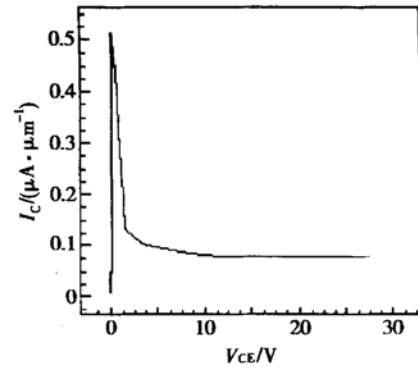


图 2 PDU CAT 输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristic of PDU CAT

(2) 负阻区: 当 V_{CE} 继续增加时, I_C 达到一个极大值后, 开始随外加偏压的增大而显著减小. 这是由于随着 V_{CE} 的增加, NPN 管的集电结反偏, 其耗尽层主要向 N_1 区扩展, 横向 PNP 管基区宽度 W_b 减小. 而由于 PDU CAT 结构的不对称性, 使得两侧横向 PNP 管受电压影响的程度各不相同: 右侧 $P_3N_3P_1$ 管 W_b 显著减小, 使得其基区内扩散电流迅速增加; 而左侧 $P_2N_1P_1$ 管初始基区宽度较大, 使得其基区宽度受电压影响较弱(如图 3 所示). 在光强不变, 注入到两侧耦合区内的空穴电流总量 I_L 保持不变的前提下, 经左侧 $P_2N_1P_1$ 管注入到 $N_2P_2N_1$ 基区内的光生空穴电流被右侧管争抢, 逐渐减小. 直到 V_{CE} 增加到使得右侧 $P_3N_1P_1$ 管的 W_b 趋近于零, $N_3P_3N_1$ 管集电结耗尽层与光电二极管 P_1N_1 势垒区相接, I_L 靠电场的作用全部提供给右侧 $N_3P_3N_1$ 管(参见图 3), 即左右两侧出现了 I_L 的争抢现象: 注入到左侧耦合区内的光生空穴电流逐渐减小, 而注入到右侧耦合区内的光生空穴电流逐渐增加. 这使得因具有较大 β 值而对 PDU CAT 输出特性具有决定性作用的左侧 $N_2P_2N_1$ 管的输出电流出现了急剧下降的现象, 从而导致了总输出电流 I_C 随电压 V_{CE} 的增加而下降, 使等效电阻 $R(=dV_{CE}/dI_C)$ 出现负值, 即 PDU CAT 产生了负阻现象.

(3) 谷值区: 当 V_{CE} 再增加时, I_C 几乎保持一低电流值不变. 这是因为此时光生空穴电流分配比例近似恒定: 大 β 值的左侧 $N_2P_2N_1$ 管基本无基极电流注入, I_C 主要由低 β 值的右侧 $N_3P_3N_1$ 管的输出电流决定.

(4) 击穿区: 当 V_{CE} 再增加时, 输出电流急剧上升, NPN 管发生击穿.

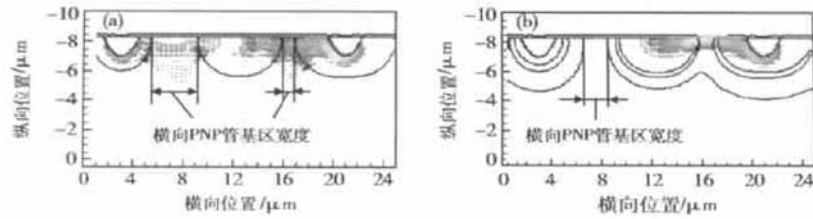


图3 空穴电流密度矢量图 (a)小 V_{CE} 下正阻区的情况;(b)大 V_{CE} 下负阻区的情况

Fig. 3 Vectorgraph of hole current density (a) Condition of positive resistance region at low V_{CE} ; (b) Condition of positive resistance region at high V_{CE}

4 PDUCAT 的定量分析

为了对 PDUCAT 的负阻区进行定量推导,我们做出如下假设:

- (1) 器件中所有的 PN 结近似为突变结;
- (2) 忽略两个耦合区中空穴的复合;
- (3) 只考虑纵向 NPN 管 CB 结处耗尽层的扩展;
- (4) NPN 管 I_C 与 I_B 之间的关系近似用 $I_C = \beta_B$

表示;

(5) 注入到两个耦合区内的空穴电流认为恒定,其值为 I_L ;

(6) 近似认为 P_1N_1 结上的电压保持光生电压 V_L 不变.

利用晶体管公式 $J_{pb} = (qD_{pb}p_{nb}/W_b)e^{qV_L/kT}$, 以及基区宽度随偏压变化的方程 $W_b = L - \sqrt{2\varepsilon_r\varepsilon_0(V_D - V_C)/qN_D}$, 列出如下方程组:

$$\begin{cases} W_{bl} = L_1 - \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0(V_D - V_1 + V)}{qN_D}} \\ I_1 = S \frac{qD_{pb}p_{nb}}{W_{bl}} e^{qV_L/kT} \\ I_2 = I_L - I_1 \\ I_C = \beta_2(I_L - I_1) + \beta_1 I_1 \end{cases}$$

式中各符号皆对横向 PNP 管而言. J_{pb} 为基区空穴电流密度; D_{pb} 为空穴扩散系数; p_{nb} 为靠近发射结处的基区少子浓度; W_b 为基区宽度; L 为零偏时的基区宽度; V_{BE} 、 V_{CB} 分别为发射结和集电结上的电压, V_D 为集电结的内建电势; ε_r 、 ε_0 分别为 Si 及真空介电常数; N_D 为集电区掺杂浓度; S 为横向 PNP 管的有效发射区面积. 其它参数如图 1(b) 中标注.

由上述方程组可得, 输出电流(A 为一常数):

$$I_C = \beta_2 I_L - A^2 \frac{\beta_2 - \beta_1}{W_{bl}} \quad (1)$$

对(1)式进行微分, 代入上述方程组, 得到(B 为一常数):

$$\frac{\partial I_C}{\partial V} = \frac{-B^2}{(L_1 - W_{bl})W_{bl}^2} \quad (2)$$

对(2)式再求导, 可知: 当 W_{bl} 趋近于零, 即 PDUCAT 位于谷值点附近的负阻区时, 随着 W_{bl} 的减小, $|\partial I_C/\partial V|$ 值逐渐增加. 也就是说, 在小电流下, 输出电流 I_C 随着 V_{CE} 电压的增加下降速度逐渐加快, 这使得由 PDUCAT 构成的振荡器, 具有了陡峭的上升和下降沿, 从而获得了较快的响应速度.

5 四个结构参数的影响

5.1 横向 $P_1N_1P_3$ 管基区宽度的影响

图 4 是改变横向 $P_1N_1P_3$ 管基区宽度并通过器件模拟得到的一组输出特性曲线. 可见随着横向基区宽度的逐渐减小, 输出电流 I_C 的峰值逐渐降低, 峰值点提前, 谷值点也相应提早出现. 但随着横向基区宽度的增加, 负阻区斜率的绝对值却逐渐减小. 以上结论也可由方程式得出: 由(1)式可知, 在同一 V_{CE} 下, 随着 L_1 的减小, W_b 减小, 致使式中第二项增加, 引起 I_C 值的减小; 又由(2)式可得, L_1 的增加引起式中分母的增大, 导致 $|\partial I_C/\partial V|$ 值的下降. 所以在实际应用中, 我们应根据要求选择适当的值, 使电流峰值既可以达到一定的数量级, 又处于快速下降的区间.

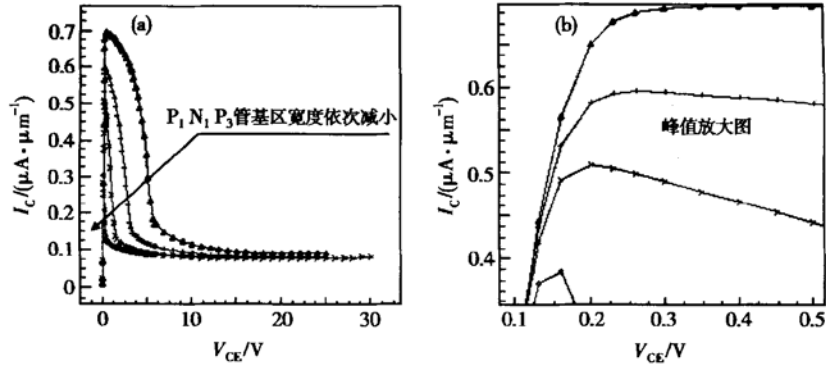


图 4 P₁N₁P₃ 管基区宽度的影响
Fig. 4 Effects of the base length of P₁N₁P₃

5.2 横向 P₁N₁P₂ 管基区宽度的影响

图 5 是改变横向 P₁N₁P₂ 管基区宽度所得到的一组输出特性曲线. 由图可见, 随着横向基区宽度的逐渐增加, 峰值电流逐渐减小, 谷值电流略有增加, 但峰值和谷值的转折点都基本保持不变. 而当横向基区增加到一临界值时(近似等于空穴扩散长度), 负阻不再出现. 所以, 我们同样要选择一适当的值, 以使它适合实际的要求.

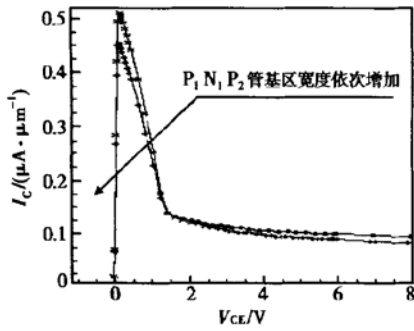


图 5 P₁N₁P₂ 管基区宽度的影响
Fig. 5 Effects of the base length of P₁N₁P₂

5.3 纵向 N₃P₃N₁ 管基区宽度的影响

图 6 是改变纵向 N₃P₃N₁ 管基区宽度所得到的一组输出特性曲线. 可见随着基区宽度的减小, 谷值电流显著增加, 峰值电流也略有提高, 但峰值谷值的转折点位置不变. 这是由于 N₃P₃N₁ 管基区宽度的减小, 引起了其电流增益 β₁ 的增加, 导致了上述现象的出现. 可见, 纵向 N₃P₃N₁ 管的特性, 是影响谷值电流大小的重要因素.

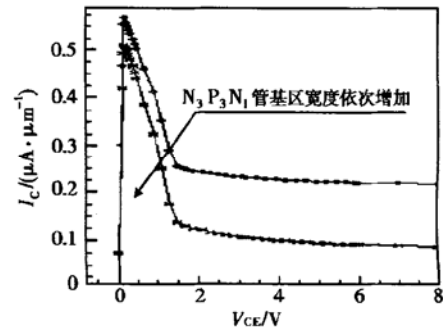


图 6 N₃P₃N₁ 管基区宽度的影响
Fig. 6 Effects of the base length of N₃P₃N₁

5.4 纵向 N₂P₂N₁ 管基区宽度的影响

图 7 是改变纵向 N₂P₂N₁ 管基区宽度所得到的一组输出特性曲线. 可以看出, 随着基区宽度的不断

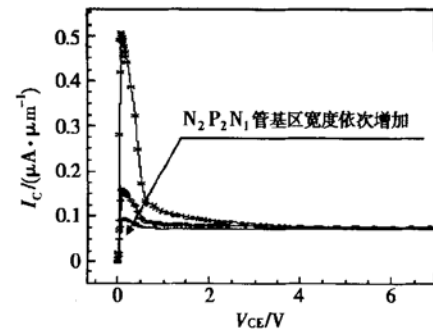


图 7 N₂P₂N₁ 管基区宽度的影响
Fig. 7 Effects of the base length of N₂P₂N₁

增加, 峰值电流不断减小, 但谷值电流几乎保持不变. 同时, 峰值与谷值点的位置也几乎不动. 这是因为: 纵向 N₂P₂N₁ 管基区宽度的增加, 导致其电流放大倍数 β₂ 减小, 成为引起上述现象的主要原因. 可

见,纵向 $N_2P_2N_1$ 管的特性,是影响峰值电流的重要因素.

总之,通过以上的分析,我们了解了几个结构参数对 PDUCAT 的电学特性的影响——横向 $P_1N_1P_3$ 管基区宽度是影响峰、谷值转折点的主要参数;横向 $P_1N_1P_2$ 管基区宽度是影响峰值、谷值电流大小的主要参数;纵向 $N_3P_3N_1$ 管基区宽度主要影响谷值电流大小;而纵向 $N_2P_2N_1$ 管基区宽度主要影响峰值电流大小.这样,我们就可以通过对结构参数的改变来调整器件的电学特性.

6 PDUCAT 的特点

(1) PDUCAT 具有间接耦合的光电探测结构,其后续输出 NPN 管的面积与等效的光电三极管面积相比较小,因而信噪比较高^[6]; (2) 用与双极工艺兼容的制备方法,比 PNEGIT、PLBT 的制备工艺简单; (3) 负阻区的各电学参数可以通过对器件结构参数的调节加以控制; (4) 除了光生空穴电流通过横向 PNP 管向纵向 NPN 管的基区注入,形成 NPN 管的基极电流以外,纵向 NPN 管也从发射区由侧面向横向 PNP 管基区注入电子电流,使得 NPN 管和 PNP 管之间形成了一个较浅的正反馈系统,从而使器件在负阻区具有较快的电流下降速度,使得由 PDUCAT 构成的振荡器具有了陡峭的上升和下降沿,获得了快速的响应能力(上面的讨论忽略了此影响).

7 结论

本文提出了 PDUCAT 这一特殊结构,并对 PDUCAT 进行了器件模拟,证实了其负阻的产生原因是由于两侧 NPN 管到中间光电二极管的距离不同,导

致它们对光生空穴电流的争抢能力随外加电压的变化产生差异;同时又由于两侧 NPN 管电流增益的各异,最终导致了负阻现象的出现.此外,还对影响器件性能的主要参数进行了分析,得出了 PDUCAT 负阻特性的几个特点,为 PDUCAT 今后的制作提供了一定的理论基础.

参考文献

- [1] Guo Weilian, Zhang Peining, Zheng Yunguang, et al. The optical bistability created by using silicon optoelectronic negative resistance devices. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(8): 108(in Chinese) [郭维廉,张培宁,郑云光,等.用硅光电负阻器件产生光学双稳态.电子学报,1998,26(8):108]
- [2] Guo Weilian, Zhang Peining, Zheng Yunguang, et al. Silicon optical bistable (SOB) devices. *Research & Progress of SSE*, 1998, 18(4): 354(in Chinese) [郭维廉,张培宁,郑云光,等.硅光学双稳态(SOB)器件.固体电子学研究与进展,1998,18(4):354]
- [3] Zheng Yunguang, Guo Weilian, Li Shurong. Fabrication and characteristics analysis of photo-negative impedance transistor. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(8): 105(in Chinese) [郑云光,郭维廉,李树荣.光电负阻晶体管(PNEGIT)的研制和特性分析.电子学报,1998,26(8):105]
- [4] Mao Luhong, Guo Weilian, Li Shurong, et al. Circuit model of photo-controlled surface negative impedance transistor and its simulation. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, 21(9): 882(in Chinese) [毛陆虹,郭维廉,李树荣,等.光电负阻晶体管 PNEGIT 的电路模型和模拟.半导体学报,2000,21(9):882]
- [5] Guo Weilian, Li Shurong, Zheng Yunguang. The preliminary study of photo negative resistance transistor. *Acta Electronica Sinica*, 1997, 25(2): 100(in Chinese) [郭维廉,李树荣,郑云光.光电负阻晶体管的初步研究.电子学报,1997,25(2):100]
- [6] Chen Changqing, He Mincai, Xin Huoping, et al. Preparatory physical model of photoelectric negative resistance for indirect coupling photodetecting structure. *Journal of Wuhan University*, 1994, (3): 55(in Chinese) [陈长清,何民才,辛火平,等.间接耦合光探测器结构光致负阻效应的物理模型.武汉大学学报,1994,(3):55]

A Novel Silicon Photoelectric Negative Resistance Device

Li Dan, Li Shurong, Xia Kejun, Guo Weilian and Zheng Yunguang

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A novel silicon photoelectric negative resistance device — photoelectric dual coupled areas transistor (PDU CAT) is proposed, which is composed of a P^+N photoelectric diode and two vertical NPN transistors beside the diode oppositely. The difference between the abilities of extraction of the photo generated hole current changes when the bias voltage varies according to the two transistors' different distances from the diode, meanwhile the current gains of the two transistors are different. The negative resistance is mainly attributed to these two points. Process and device simulations are made respectively. The principal of PDU CAT and effects of its main parameters are further discussed and the primary device model is established.

Key words: photoelectric devices; negative resistance; simulation; transistor

PACC: 7130 **EEACC:** 4250; 2560B; 2560Z

Article ID: 0253-4177(2003)10-1078-06

Li Dan, female, was born in 1980, MS candidate, working with novel semiconductor material and R&D of VLSI.

Li Shurong male, was born in 1946, professor, working with novel semiconductor device and R&D of VLSI.

Xia Kejun male, was born in 1978, MS candidate, working with novel semiconductor material and device physics.

Received 4 November 2002, revised manuscript received 14 April 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics