

硅光电负阻器件的光双稳态瞬态特性

郑元芬¹, 郭维廉¹, 张世林¹, 张培宁¹, 李树荣¹, 郑云光¹, 陈弘达², 吴荣汉², 林世鸣², 芦秀玲²

(1. 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072; 2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘 要: 在本文中,一方面对电路参数与硅光电负阻器件的光学双稳态开关时间的关系进行了研究,另一方面对器件在低、中、高三个不同输入光强区的光学双稳态响应的变化趋势进行了研究. 硅光电负阻器件包括有各种类型,本文主要对“ λ ”型双极光电负阻晶体管(PLBT)以电阻和光电二极管作为负载的情况进行了讨论.

关键词: 硅光电负阻器件; “ λ ”型双极光电负阻晶体管(PLBT); 光双稳态开关时间

中图分类号: TN15 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 08-0066-03

The Optical Bistability Transient Characteristics of Silicon Optical-electronic Negative Resistance Device

ZHENG Yuan-fen¹, Guo wei-lian¹, ZHANG Shi-lin¹, ZHANG Pei-ning¹, LI Shu-rong¹,
ZHENG Yun-guang¹, CHEN Hong-da², WU Rong-han², LIN Shi-ming², LU Xiu-ling²

(1. School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Semiconductors Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the relationship of circuit parameters and the optical bistability switching time of silicon photo-electronic negative resistance device is studied. The varying response to low, medium, high-light-input-intensity regions is also studied. There are many kinds of devices in silicon photo-electronic negative resistance device. In this paper, the type of Photo Lambda Bipolar Transistor (PLBT) with resistance load and photo diode load is discussed.

Key words: silicon photo-electronic negative resistance device; photo lambda bipolar transistor (PLBT); the optical bistability switching time

1 引言

光学双稳态是指在一定的输入光强范围内,存在着两种可能的输出光强状态,而且可以用光学方法实现两个状态间的开关转换. 能实现这种功能的器件称为光学双稳态器件. 光学双稳态器件具有光开关、光逻辑、光存储、光放大、光限幅等光计算功能. 它是光计算、数字光信息处理和光通讯所需的关键性器件之一. 已报导过的光双稳态器件有自电光效应器件(SEED)^[1], 多量子阱 F-P 标准具^[2], 含饱和吸收层的激光器^[3], LED 与 npn 或 HBT 组成的光双稳态开关器件^[4]等. 但它们都是用 GaAs/AlGaAs 等化合物半导体材料制作的. 这些器件虽然具有较好的光电子性能,然而由于其材料昂贵、制备工艺复杂以及难以与硅 IC 集成,故妨碍了光电子器件集成化的进一步发展. 而利用硅光电负阻器件本身的光电负阻特性,并和一定的负载结合,可以在器件的输入-输出端得到硅光学双稳环^[5,6]. 与已有的光学双稳态器件相比,硅光电负阻器件的优点在于它易于集成,与硅工艺兼容. 它的主要缺点是瞬态响应速度较慢,光双稳态转换的速度也较其它的光双稳态器

件要慢. 因此,要使硅光电负阻器件能在光学双稳态的有关领域得以应用,必须尽量提高它的瞬态响应速度.

本文的主要目的是给出并分析电路参数对硅光电负阻器件的光学双稳态开关时间的影响,为最佳使用此类器件提供参考. 实验中使用的器件为“ λ ”型双极光电负阻晶体管(PLBT)

2 PLBT 的工作原理及光学双稳态转换机理简介

PLBT 是用光电二极管代替三端负阻器件“ λ ”型双极晶体管(LBT)中的双极管作为主器件而构成的光电负阻器件. 其器件结构和等效电路如图 1 所示. 事实上可以把 npn 光电二极管视为由常规的光电二极管和 npn 双极晶体管所构成. 光电二极管代表着该器件对入射光信号的吸收,它起着产生一个有效基极注入电流的作用,该电流的大小基本上正比于入射光的输入功率, npn 双极晶体管具有常规的双极晶体管的工作特性,是 PLBT 输出特性的主要执行器件,其基极驱动电流等于由光电二极管产生的有效基极注入电流减去 n 沟 MOSFET 的源漏电流. n 沟 MOSFET 为 PLBT 器件内部的反馈

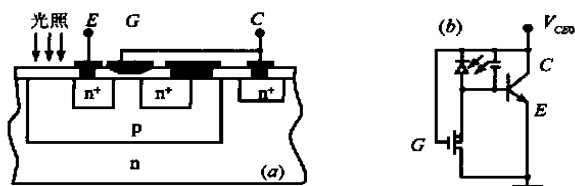


图1 PLBT的器件结构(a)和等效电路(b)

器件,其正反馈作用使 PLBT 具有负阻输出特性. 当 V_{CE} 小于 MOSFET 的开启电压时, PLBT 的输出特性与一般的双极晶体管的输出特性一致, 而当 V_{CE} 大于或等于 MOSFET 的开启电压时, 双极晶体管工作于放大区, MOSFET 则进入了导通状态, 从而其源漏电流随 V_{CE} 的增大而增大, 致使双极晶体管的基极注入电流减小, 从而集电极输出电流相应减小, 器件进入负阻区, 这样在 PLBT 的输出特性曲线上呈现出负阻特性. 关于 PLBT 和 LBT 更详细的介绍和讨论见参考文献 [7~9].

PLBT 的光学双稳态的产生与器件的光电负阻特性是直接相关的. 图 2 为 PLBT 以电阻作为负载时的光电负阻特性曲线图 2(a) 与光双稳特性曲线图 2(b). 在一定的负载情况下, 顺序改变器件输入光强的取值, 可得到一族带有负阻线的输出特性曲线. 由该输出特性曲线族可转换得到对应的输入光强-输出电流特性曲线. 在转换的过程中, 必须注意到当器件的工作点位于负阻区时是不稳定的, 故会跳变到处于同一输入光强强度的输出特性曲线与负载线的处于正阻区或谷值区的交点处, 从而在转换之后的特性曲线上得到光学双稳态回线. 具体的转换过程参见参考文献 [5, 6].

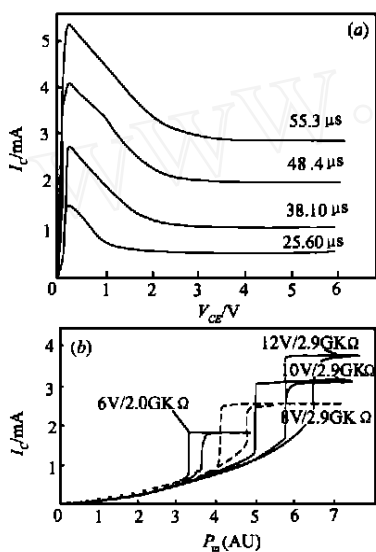


图2 PLBT 以电阻为负载时的负阻特性曲线(a)和光双稳曲线(b)

3 实验原理

在实验中, 用 OSCILLOSCOPE V-212 (20MHz) 双线示波器同时显示 PLBT 的输入光源和输出电流的脉冲波形以读取开关时间. PLBT 的光输入由 HP9605 HFBR-1402 红外快速发光管提供, 该发光管用直流偏置电源和脉冲电源驱动. 实际接到示波器上的脉冲波形在输入端为驱动发光管的脉冲电

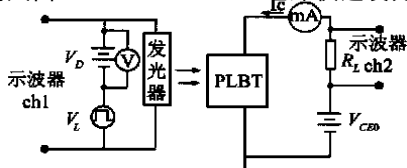


图3 PLBT 光双稳态瞬态特性测试电路

源 ($V_D + V_L$), 在输出端为负载两端的电压 V_{RL} . 实际上测量忽略了发光管响应的滞后以及负载对器件开关时间的影响. 实验所用的测试电路如图 3 所示.

由于实际应用中器件的负载一般不用纯电阻, 而用光电二极管或光电负阻器件代替; 但是在理论分析中, 用电阻作负载的情况比较简单, 易于进行分析, 所以在实验中对器件以电阻作负载和以光电二极管作负载的情况均进行了测试.

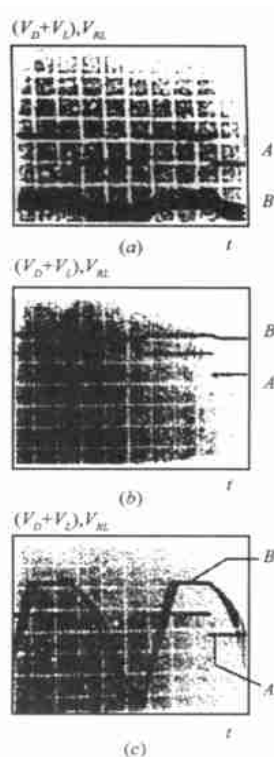
光学双稳态瞬态特性参数主要有光双稳转换的上升时间 t_r 和下降时间 t_f . 在本实验中, 由于仪器条件的限制, 实际读取的上升时间和下降时间是这样定义的: 从输入脉冲开始跳变到相应的输出跳变完成跳变幅度的 90% 时所需的时间. 因此, 本文中提到的上升时间为常规开关时间定义中的延迟时间和上升时间之和, 下降时间为常规定义方式中的贮存时间和下降时间之和.

4 不同输入光强区瞬态特性比较

光电负阻器件的输出光电电流以由低态跳变到高态所对应的输入光功率称开启光功率, 记为 P_{on} , 输出光电电流由高态跳变到低态所对应的输入光功率称关闭光功率, 记为 $P_{off}^{[10]}$. 从图 2(b) 中可看出, 保持输入脉冲光强一定, 当输入总光强 P_{in} 低于 P_{off} 时, 可得到器件在低光强缓变区的瞬态特性; 当 P_{in} 高于 P_{on} , 而输入直流光强低于 P_{off} 时, 可得到器件在光双稳跳变区的瞬态特性; 当输入直流光强高于 P_{on} 时, 可得到器件在高光强缓变区的瞬态特性.

图 4 为在示波器上得到的 PLBT 在低光强缓变区、光双稳跳变区、高光强缓变区时输入和输出的瞬态波形图. 其中波形 A 为输入的瞬态波形图, 纵坐标为 ($V_D + V_L$); 波形 B 为输出的瞬态波形图, 纵坐标为 V_{RL} .

在实验中测得的有关结论为上升时间在低光强缓变区时最大, 在双稳跳变区时次之, 在高光强缓变区时最小; 下降时间在双稳跳变区时最大, 在高光强缓变区时次之, 在低光强缓变区时最小. 总而言之, 器件处于高光强缓变区时开关特性最好, 在低光强缓变区时次之, 在双稳跳变区时最差. 根据硅光电负阻器件的光电负阻特性曲线和光双稳特性曲线之间的对应关系^[5, 6], 低光强缓变区对应于负阻曲线的谷值区部分, 高

图4 PLBT 在低光强缓变区(a)、光双稳跳变区(b)、高光强缓变区(c)时输入和输出的瞬态波形图, 其中 t 0.1ms/div, ($V_D + V_L$) 0.1V/div, V_{RL} 50mV/div

光强缓变区对应于负阻曲线的正阻区部分,光双稳跳变区对应于负阻曲线的负阻区部分.实验得出的结论与硅光电负阻器件的开关特性在临近峰值的正阻区最好、在谷值区次之、在负阻区最差的有关结论(将有另文发表)是相符合的.

5 光双稳瞬态特性

HLBT在以电阻为负载的情况下,输入光强(P_{in})、负载电阻(R_L)、直流偏置电压(V_{CE0})与光双稳开关时间的关系如表1、表2、表3所示.

表1 HLBT以电阻为负载时开关时间与输入光强的关系

($R_L = 3k\ \Omega$, $V_{CE0} = 3.0V$)

$P_{in}(\mu W)$	19.87	26.7	31.1	39	45.5	51.7	57.2
$t_r(\mu s)$	60	35	25	20	15	13	10
$t_f(\mu s)$	55	60	60	60	60	60	60

表2 HLBT以电阻为负载时开关时间与负载电阻的关系

($P_{in} = 57.2\mu W$, $V_{CE0} = 3.0V$)

$R_L(k\ \Omega)$	0.1	0.3	0.5	0.8	1	2	5	9
$t_r(\mu s)$	10	20	20	17	12	10	10	10
$t_f(\mu s)$	5	10	15	25	30	60	100	135

表3 HLBT以电阻为负载时开关时间随直流偏置电压变化的关系

($P_{in} = 57.2\mu W$, $R_L = 1.8k\ \Omega$)

$V_{CE0}(V)$	1	2	3	4	5	6
$t_r(\mu s)$	8	8.8	10	11.6	12	12.4
$t_f(\mu s)$	85	60	50	48	43	40

由表1可以看出上升时间随输入光强的增大而减小,下降时间随输入光强的增大而增大并最终达到一个饱和值.从表2可以看出下降时间随负载电阻的增大而增大,上升时间的变化规律较为复杂,当负载电阻在 $0.3 \sim 0.5k\ \Omega$ 范围内时,上升时间最大,在此范围之外,上升时间分别随电阻的增大和减小而减小.从表3可以看出上升时间随直流偏置的增大而增大,下降时间随直流偏置的增大而减小.

HLBT的输出电流由低态跳变到高态,相当于其中的光电双极管从截止状态转到饱和状态;由高态跳变到低态,则相当于其中的光电双极管从饱和状态转到截止状态.当输入光强增大时,相当于HLBT中的光电双极管的基极驱动电流增大,从而器件较易由截止转到饱和状态,上升时间减小,相应地由于基区过存储电荷的作用,下降时间增大.当负载电阻增大,直流偏置减小时,相当于器件达到临界饱和状态所需的基区驱动电流较小,而相应的基区过驱动电流较大,从而器件较易由截止状态进入饱和状态,而较难由饱和状态转到截止状态,所以上升时间减小,下降时间增大.

HLBT以光电二极管作为负载时,负载光强较强相当于负载等效电阻较小.测量结果表明上升时间和下降时间均随输入光强的增大而减小,随直流偏置电压的增大而增大.与电阻作负载的情况相比较,二者上升时间变化的趋势是一致的,下降时间的变化趋势则相反.在负载光强较小时,输出波形较差,增大负载光强使输出波形比较理想(较接近方波)以后,上升时间随负载光强的增大而增大,下降时间随负载光强的增

大而减少.同电阻作负载的情况相比较,上升时间变化的趋势与负载电阻较大时($>0.5k\ \Omega$)的变化趋势一致,下降时间变化的趋势是一致的.

HLBT以光电二极管作为负载时,开关特性优于以电阻作为负载的情况.以测得的最好结果来看,也反映了这一点.在实验中,HLBT以光电二极管作为负载时测得的最小上升时间为 $2\mu s$,最小下降时间为 $3.6\mu s$;而以电阻作为负载时测得的最小上升时间为 $4\mu s$,最小下降时间为 $10\mu s$.

从实验结果来看,HLBT在以电阻作为负载的情况下,选择各个电路参数的范围如下: $40\mu W \leq P_{in} \leq 60\mu W$, $0.1k\ \Omega \leq R_L \leq 2k\ \Omega$, $2V \leq V_{CE0} \leq 12V$,基本上能保证上升时间 $t_r \leq 20\mu s$,下降时间 $t_f \leq 60\mu s$.因为上升时间和下降时间对电路参数的要求是矛盾的,所以必须综合考虑各参数的选择.在以光电二极管作为负载的情况下,在负载光强大到足以得到比较理想的输出波形后,保持强度基本不变,选择输入光强在 $40\mu W$ 到 $60\mu W$ 之间,直流偏置电压在 $1V$ 到 $4V$ 之间,可以保证上升时间小于 $20\mu s$,下降时间小于 $60\mu s$,其中只要使 V_{CE0} 较小,可以使上升时间和下降时间均较小,如 V_{CE0} 为 $1V$ 时, t_r 为 $4\mu s$, t_f 为 $5\mu s$; V_{CE0} 为 $2V$ 时, t_r 为 $2\mu s$, t_f 为 $10\mu s$.如果对电路参数进行进一步的调整,可望得到更好的开关特性.

6 结论

根据实验结果和本文对开关时间的定义方式(测量得到的开关时间较常规定义的开关时间要大),目前硅光电负阻器件(HLBT)的开关速度最快能达到几 μs 量级,但如果外部电路参数选择不当,则有可能达到几十甚至几百 μs 量级.由此可见硅光电负阻器件的外部电路参数合适与否对器件的开关速度有着相当大的影响.在实际应用中,应该恰当地选择外部电路参数,以使器件的开关速度尽可能快.

作者简介:



郑元芬 1998年毕业于天津大学电子信息工程学院微电子系,现在天津大学电信学院微电子系攻读硕士学位,研究方向为新型器件及集成电路.



郭维廉 1952年毕业于清华大学物理系,现任天津大学电子信息工程学院教授.中国电子学会会士,IEEE高级会员.近期研究方向包括MIS隧道结器件、低温和宽温区双极晶体管、三端负阻器件、光电负阻器件、低温BiCMOS电路、SOI/GesSi/BiCMOS电路等,发表论文近90篇.

(下转第71页)

求,其基本方法是通过在 RTL 级改变结构设计和在门级改变引起功耗的因素(时钟频率、线网的负载电容等)。因此功率优化时同样必须考虑布线后互连的影响。

表 1 BAP1024 芯片功耗(工作条件 WCCOM)

时钟频率(MHz)	40	66	100
动态功耗(W)	2.59	4.32	5.43

表 2 BAP1024 芯片运算性能

处理速度	40(MHz)	66(MHz)	100(MHz)
1 位加	10.24GOPS	16.89GOPS	25.60GOPS
8 位加	1.638GOPS	2.703GOPS	4.095GOPS
12 位加	1.106GOPS	1.824GOPS	2.765GOPS
16 位加	835.6MOPS	1.378GOPS	2.089GOPS
8 位乘	114.7MOPS	189.2MOPS	286.7MOPS
12 位乘	75.86MOPS	125.1MOPS	189.6MOPS
16 位乘	56.88MOPS	93.8MOPS	142.2MOPS
8 位乘加	876.6MOPS	1.446GOPS	2.191GOPS
12 位乘加	591.0MOPS	975.1MOPS	1.477GOPS
16 位乘加	446.2MOPS	736.2MOPS	1.115GOPS

为此,在 BAP1024 芯片设计流程中引入 Cadence EDA 工具中的整体规划(floorplanning)技术,即按给定的定时与面积约束对版图做一种预布,预布后的版图信息通过物理设计交换格式(physical design exchange format:PDEF)文件、标准时序延迟格式(standard delay format:SDF)延迟文件及线网电容数据集(load)的形式给出。这些信息再通过 Synopsys 综合工具中的整体规划管理(floorplan manager)返标到前端设计,约束数据并在速度、面积和功耗三个方面进行再优化。如设计结果不能满足预定要求,则运用工程上设计修改(engineering change order:ECO)修改网表和单元,实现修改变动逐步逼近。所以,就 BAP1024 的 EDA 工具上的实现流程而言,前端的设计综合与后端的版图紧密相连,如图 2 所示。该流程主要围绕着综合优化、延迟计算、整体布局规划、功耗估计、静态时序分析及仿真验证等一系列问题进行的。

4 BAP1024 的设计结果及处理器阵列的运算性能

在 ULTRA SUN 工作站上采用 EUROPRACTICE 的 0.35 μ m

CMOS 低功耗库 MTC45000 系列, Synopsys EDA 软件进行逻辑综合。综合结果表明: BAP1024 的电路规模为 40 万门左右,最高时钟频率达 100MHz。表 1 给出了该芯片在 WCCOM 工作条件下,运行在不同的时钟频率下得到的功耗值,它的处理速度性能如表 2。

5 结束语

BAP1024 综合了国外 SIMD 商业化芯片 GAPP 和 MPP 等的功能特点,充分考虑了图像处理领域的应用需要,使得功能结构更加完善。该芯片可以嵌入式地应用于各种实时图像处理系统中,用于完成运算量极大的中低层处理操作,由于其硬件结构与图像的数据结构相匹配,因而可以获得极高的并行处理效率。

参考文献:

- [1] Tsu-chang Lee. The new line in IC design [J]. IEEE Spectrum, 1997, 52 - 58.
- [2] Masafumi Miyamoto. High-speed and low-power interconnect technology for sub-quarter-micron ASICs [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 1997, 44(2): 250 - 256.
- [3] Chen Mie. A SIMD-systolic architecture and VLSI chip for the two-dimensional DCT and IDCT [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1993, 39(4): 859 - 869.

作者简介:



来金梅 1998 年毕业于上海交通大学,获博士学位。现为浙江大学控制系博士后,主要研究兴趣包括集成电路的设计理论和方法、高速电路的互连及延迟等。

(上接第 68 页)

参考文献:

- [1] Miller D A B, Chemla D S, Damen T C, et al. IEEE J Quantum Electron, 1985, QE-21(9): 1462 - 1476.
- [2] Gibbs H M, McCall S J, Venkatesan T N C, et al. Appl Phys Lett, 1982, 41(3): 221 - 222.
- [3] Kawaguchi H, Iwane G. Electron Lett, 1981, 17(2): 167 - 168.
- [4] 王守武, 吴荣汉, 张权生. 半导体学报, 1986, 7(2): 147 - 153.
- [5] 郭维廉, 张培宁, 郑云光, 李树荣, 郭钢. 用光电负阻器件产生光学双稳态 [J]. 电子学报, Aug. 1998, 26(8): 108 - 110.
- [6] 郭维廉, 张培宁, 郑云光, 李树荣, 郭钢. 硅光学双稳态(SOB)器件 [J]. 固体电子学研究进展, Nov. 1998, 1(4): 354 - 361.
- [7] 郭维廉, 李树荣, 郑云光. 光电负阻晶体管的初步研究 [J]. 电子学报, Feb. 1997, 25(2): 100 - 102.
- [8] 郭维廉. 三端电压控制型负阻器件(4) [J]. 半导体杂志, Dec. 1994, 19(4): 28.
- [9] 张培宁. 硅光电负阻器件及其应用研究 [D]. 申请天津大学工学博士学位论文, 1999, 5: 17 - 18.
- [10] 郭维廉, 郑元芬, 沙亚男, 张培宁等. 硅光电负阻器件的光电负阻特性与光学双稳态特性间的对应关系 [J]. 半导体光电, 1999, 录用待发表.