第 21 卷第 9 期　　半 导 体 学 报　　Vol. 21, No. 9
2000 年 9 月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　Sep., 2000

光电负阻晶体管 PNEGIT 的电路模型和模拟*

毛陆虹　郭维廉　李树荣　郑云光　张世林　沙亚男　吴霞宛

(天津大学电子信息工程学院微电子系, 天津　300072)

摘要: 给出了光表面控制负阻晶体管 PNEGIT (Photo-Controlled Surface Negative Impedance Transistor) 的电路模型, 从栅控晶体管数学模型出发并结合光电池的电路模型, 用电路模型描写带有表面复合和体复合的器件, 模型为研究 PNEGIT 和表面控制负阻晶体管 NEGIT (Surface-Controlled Negative Impedance Transistor) 以及探讨该类器件的新用途提供了一种手段, 把模拟结果与实验进行了对比.

关键词: PNEGIT; 电路模型; 模拟

EEACC: 2560; 4250; 1270E; 2560B

中图分类号: TN32　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0253-4177(2000)09-0882-05

Circuit Model of Photo-Controlled Surface Negative Impedance Transistor and Its Simulation*

MAO Lu-hong, GUO Wei-lian, LI Shu-rong, ZHENG Yun-guang,
ZHANG Shi-lin, SHA Ya-nan and WU Xia-wan

(*Microelectronics Department, College of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*)

Received 18 October 1999, revised manuscript received 13 January 2000

Abstract: A circuit model of Photo-Controlled Surface Negative Impedance Transistor (PNEGIT) is

* 国家自然科学基金资助, 基金号 69477011; 天津市自然科学基金资助, 基金号 983601411[Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69477011 and by National Natural Science Foundation of Tianjing, China Under Grant No. 983601411].

毛陆虹　男, 1961 年出生, 副教授, 博士生, 目前从事半导体物理与器件的科研工作[Mao Lu-hong was born in Wu-han, China, on April 10, 1961. He received B. Sc. degree in 1982. His doctoral thesis is on Simulation of Si Photoelectronic Negative Resistance Devices and the GeSi HBT based on SOI. During 1993 to 1998, he acted as an Associate Professor at Zhengzhou University in China, with the research on telecommunications. His current research interest includes Si Photoelectronic Negative Resistance Devices, GeSi HBT and Smart Photonic Components].

郭维廉　男, 1930 年出生, 教授, 目前从事半导体物理与器件的科研和教学工作.

李树荣　男, 1946 年出生, 教授, 目前从事半导体物理与器件的科研和教学工作.

1999-10-18 收到, 2000-01-13 定稿

presented. Based on the mathematical model of a gate-controlled transistor and the circuit model of solar cells, a device with surface and body recombinations is described for the first time by a circuit model, which provides a method for studying PNEGIT, Surface Negative Impedance Transistor (NEGIT) and their applied circuits. Results of simulation and experiment are compared.

Key words: photo-controlled surface negative impedance transistor; circuit model; simulation
EEACC: 2560; 4250; 1270E; 2560B
Article ID: 0253-4177(2000)09-0882-05

1　引言

硅基光电子器件与现行的硅 IC 集成工艺兼容，从而能推动光电子集成的进一步发展. 1977 年 Thomas 等人报道了 NEGIT(Surface Nagative Impedance Transidor)[1]，我们在 1998 年报道了 PNEGIT(Photo-Controlled Surface Negative Impedance Transistor)[2]. PNEGIT 能将光信号转变为电信号，能输出负阻特性，可以用作光控电流开关、光控振荡器及光双稳器件[2,3]，是很有希望得到应用的硅基光电子器件. PNEGIT 其结构为栅控光电晶体管，将栅极与集电极相连，通过栅压(即 V_{CE})改变表面复合来改变有源基区的电流产生负阻的器件. 为详细了解器件的机理和进一步研究这一类器件和扩大其应用范围，我们给出了 PNEGIT 的电路模型. 尽管 PNEGIT 还未进入实用阶段，但这里给出的模型为建立光电器件的电路模型和带有表面复合和体复合器件的电路模型提供了可借鉴的经验. 本文把光电晶体管和 NEGIT 的理论模型相结合，给出 PNEGIT 的理论模型，利用复合电流是对光生基极电流分流这一概念，建立了 PNEGIT 的电路模型，模拟结果与实验结果进行了对比. 对比说明模拟与实验基本一致. 最后解释了模拟结果与实验结果存在差异的原因.

2　理论

光电负阻晶体管 PNEGIT 器件的结构见图 1. 工作时栅极与集电极相连，当 V_{CE}增加时，栅压也增加. 在光生基极电流不变的情况下，栅极上的正电压使栅下基区耗尽区增大，表面复合和体复合增加，使到达有源基区的有效基极电流减少，从而导致集电极电流减少而产生负阻. 这一过程可以用数学模型描述如下.

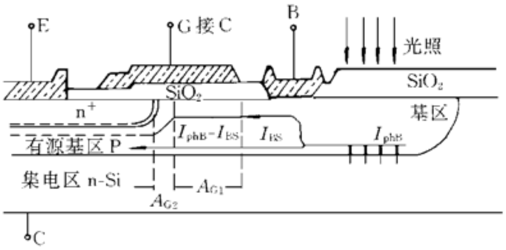

图 1　PNEGIT 横截面图
FIG. 1　Cross-Section for PNEGIT

当一定光强照射 PNEGIT 的基区时流过集电极电流为：

$$I_{phC} = h_{FE}(I_{phB})_{eff} + I'_{CE0} \tag{1}$$

式中　h_{FE}是直流放大系数；I'_{CE0}为光照时不受栅控但随光强变化的 CE 间漏电流，$(I_{phB})_{eff}$为有效基极电流，

$$(I_{phB})_{eff} = I_{phB} - I_{BS} \tag{2}$$

I_{phB}是光生基极电流. (1) 式的物理意义为一常规光电三极管其光生基极电流被扣除了 I_{BS}，复合电流 I_{BS}为：[1,4]

$$I_{BS} = I_{BS1} + I_{BS2} + I_{BS3} \tag{3}$$

I_{BS1}为冶金结空间电荷层以外栅电极下面 Si/SiO₂ 界面复合电流，

$$I_{BS1} = qU_sA_{G1} \tag{4}$$

$$U_s = (p_sn_s - n_i^2)\sigma_sV_{th}\frac{N_{it}}{n_i} \times \frac{\cosh^{-1}\left[\frac{p_s + n_s}{2n_i}\right]}{\left[\left[\frac{p_s + n_s}{2n_i}\right]^2 - 1\right]^{1/2}}$$

$$= (p_sn_s - n_i^2)\sigma_sV_{th}\frac{N_{it}}{n_i} \times \frac{\ln\left[\frac{p_s + n_s}{2n_i} + \sqrt{\left[\frac{p_s + n_s}{2n_i}\right]^2 - 1}\right]}{\left[\left[\frac{p_s + n_s}{2n_i}\right]^2 - 1\right]^{1/2}} \tag{5}$$

$$P_s = N_{ABS}\exp\left[-\frac{qV_s}{kT}\right] \tag{6}$$

$$n_s = \frac{n_i^2}{p_s}\exp\left[\frac{qV_{BE}}{kT}\right] \tag{7}$$

$$V_s = \frac{qN_{ABS}}{2\epsilon_s\epsilon_o}x_d^2 \tag{8}$$

$$x_d = \epsilon_s\left\{-\frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}} + \left[\frac{d_{ox}{}^2}{\epsilon_{ox}{}^2} + \frac{2\epsilon_o(V_{CE} - V_{FB})}{q\epsilon_sN_{ABS}}\right]^{1/2}\right\} \tag{9}$$

式中 U_S 是单位面积内的表面复合率;A_{G1}是冶金结空间电荷层以外栅电极下面积; p_s、n_s、n_i 分别是表面空穴、电子浓度和本征载流子浓度;σ_s 是俘获截面;v_{th}是热运动速度;N_{it}是界面陷阱面密度;N_{ABS}是基区表面受主浓度;V_s 是表面电势;V_{FB}是平带电压; x_d 是耗尽区厚度;ϵ_s、ϵ_o、ϵ_{ox}分别是硅、真空、SiO_2 介电常数;q、k、T 分别是电子电荷、玻尔兹曼常数和开氏温度.

I_{BS2}为冶金结与 Si/SiO_2 界面相交处表面复合电流.

$$I_{BS2} = qA_{G2}n_sS \tag{10}$$

$$S_{max} = \frac{N_{ABS}}{4n_i}v_{th}\sigma_sN_{it} \tag{11}$$

$$I_{BS2} = \frac{qA_{G2}n_iv_{th}\sigma_sN_{it}}{4}\exp[q(V_{BE} + V_s)/kT] \tag{12}$$

式中 A_{G2}是为冶金结与 Si/SiO_2 界面相交处面积;S 是表面复合速度,S_{max}是最大表面复合速度.

I_{BS3}为栅下基区内表面空间电荷层内的体复合电流:[5]

$$I_{BS3} = qU_{FIJ}x_dA_{G1} \tag{13}$$

$$U_{FIJ} = \sigma_bv_{th}N_tn_i\frac{1}{2}\exp\left[\frac{qV_{BE}}{2kT}\right] \tag{14}$$

式中 U_{FIJ}是体复合率;σ_b是体复合俘获截面;N_t 是体复合中心密度.

一般情况下,光照时基极开路,光生基极电流[6]

$$I_{phB} = I_F - I_s\left[\exp\left[\frac{qV_{BC}}{kT}\right] - 1\right] \tag{15}$$

式中 I_F 是光生电流;I_s 是反向饱和电流.

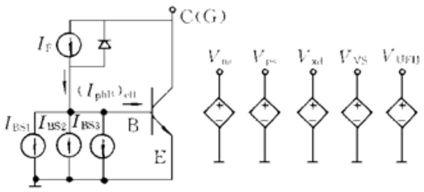

图 2 PNEGIT 的电路模型

FIG. 2 Circuit Model for PNEGIT

3 电路模型

根据以下几条原则建立 PNEGIT 电路模型,见图 2.

1. 复合电流用受控电流源表示,图中分别为 I_{BS1}、I_{BS2}、I_{BS3},从上节的原理可知复合电流相当与基极电流的分流.

2. 变量 p_s、n_s、V_s、x_d、U_{FIJ}用受控电压源产生,图中分别用 V_{ps}、V_{ns}、V_{vs}、V_{xd}、V_{UFIJ}表示.

3. 统一量纲,本例用 cm. g. s 制,这有利于防止溢出.

4. 光生电流用光电池等效电路.
5. 用 α_1、α_2 作为防止溢出常数.

$$I_{phB} = I_F - I_s\left[\exp\left(\frac{qV_{CB}}{kT}\right) - 1\right] \tag{16}$$

$$(I_{phB})_{eff} = I_{phB} - (I_{BS1} + I_{BS2} + I_{BS3}) \tag{17}$$

$$I_{BS1} = q\sigma_s v_{th} A_{G1}(\alpha_2 V_{ps}\alpha_1 V_{ns} - n_i^2)\frac{N_{it}}{n_i} \times \frac{\ln\left[\frac{\alpha_2 V_{ps} + \alpha_1 V_{ns}}{2n_i} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_2 V_{ps} + \alpha_1 V_{ns}}{2n_i}\right)^2 - 1}\right]}{\left[\left(\frac{\alpha_2 V_{ps} + \alpha_1 V_{ns}}{2n_i}\right)^2 - 1\right]^{1/2}} \tag{18}$$

$$V_{ps} = N_{ABS}\exp\left(\frac{-qV_{vs}}{kT}\right)\frac{1}{\alpha_2} \tag{19}$$

$$V_{ns} = \frac{n_i^2}{V_{ps}}\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right)\left(\frac{1}{\alpha_1}\right) \tag{20}$$

$$V_{vs} = \frac{qN_{ABS}V_{xd}^2}{2\epsilon_s\epsilon_o} \tag{21}$$

$$V_{xd} = \epsilon_s\left\{-\frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}} + \left[\frac{d_{ox}{}^2}{\epsilon_{ox}{}^2} + \frac{2\epsilon_o(V_{CE} - V_{FB})}{q\epsilon_s N_{ABS}}\right]^{1/2}\right\} \tag{22}$$

$$I_{BS2} = \frac{qA_{G2}n_i v_{th}\sigma_s N_{it}}{4}\exp[q(V_{BE} + V_{vs})/kT] \tag{23}$$

$$I_{BS3} = qV_{UFIJ}V_{xd}A_{G1} \tag{24}$$

$$V_{UFIJ} = \sigma_b v_{th} N_t n_i \frac{1}{2}\exp\left(\frac{qV_{BE}}{2kT}\right) \tag{25}$$

4　实验和模拟结果

图 3 给出光照度分别为 20、40、60lx 的光照射某一 PNEGIT 得到的负阻输出特性曲线. 图 4 给出 I_F 分别为 12、20、26.5μA 模拟的输出特性, 模拟采用 PSPICE, 晶体管采用模型库中的 Q2N222, 其它参数选择 V_{FB}= 3V, σ_s= 10^{-15}cm^2, v_{th}= 10^7cm/s, N_{it}= 6×10^{11} cm^{-2}, N_{ABS}= 3.5×10^{17} cm^{-3}, ϵ_s= 11.7, d_{ox}= 0.58μm, σ_b= 10^{-13} cm^2, N_t= 10^{13}cm^{-3}, A_{G1}= 5.632×10^{-5} cm^2, A_{G2}= 5.632×10^{-7} cm^2. 两图对比可见在 V_{CE}较小时实验和模拟存在差别, 这是因为实验用的 PNEGIT 与模型库中的 Q2N222 的饱和压降不同. 按理, 光生电流与光照度有一一对应关系, 关系式详见文献[7], 而实验时光强度线性增长, 模拟对应的 I_F 不是线性增长, 这是因为实验中测量光照度的勒克斯计光谱响应是可见光, 我们研制的 PNEGIT 器件光谱响应是红光, 由于光谱响应不同使得测试结果没有得到一一对应关系. 负阻曲线部分模拟与实验符合得较好, 这是由于模拟采用了与实验一致的参数.

为得到 I_{BS}的实验曲线, 先测得负阻输出特性, 该特性为(1)式所描述, 再将栅极与基极短路(参见图 1), 其它条件不变, 测得输出特性. 此特性即为普通光电三极管的输出特性, 该特性可以描述为:

$$I'_{phC} = h_{FE}I_{phB} + I'_{CE0} \tag{26}$$

(26)式-(1)式可以得到 $h_{FE}I_{BS}$即

$$I_{BS} = (I'_{phC} - I_{phC})/h_{FE} \tag{27}$$

图 5 给出上述过程. 图中还给出模拟得到的 $h_{FE}I_{BS}$曲线用以对比. 从图可见实验的 I_{BS}变化较模拟的 I_{BS}快(这里认为 h_{FE}为常数), 这与文献[1]报道的模拟和实验存在的差别一样. 这说明现有的表面复合理论模型还不十分精确. 由于文献[1]没有采用电路模型模拟, 只能得到模拟的 I_{BS}而无法得到模拟的输出特性 $I_{phC}(V_{CE})$.

图 6 给出模拟的 I_{BS1}、I_{BS2}和 I_{BS3}曲线, 可以看出 I_{BS2}较大, 是产生负阻的关键, I_{BS1}对负阻起一定作用,

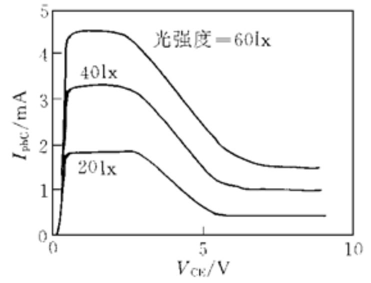

图 3 PNEGIT 的实验结果

FIG. 3 Experimental Results for PNEGIT

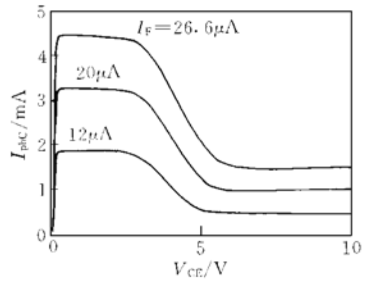

图 4 PNEGIT 的模拟结果

FIG. 4 Simulation Results for PNEGIT

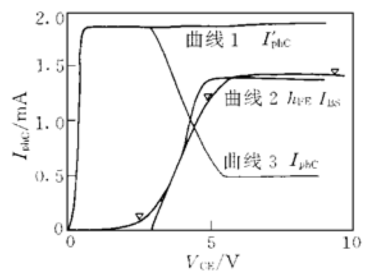

图 5 由(26)式-(1)式得到 $h_{FE}I_{BS}$ 曲线

▽ 为模拟的 $h_{FE}I_{BS}$ 曲线

FIG. 5 I_{phc}–V_{CE} Curves

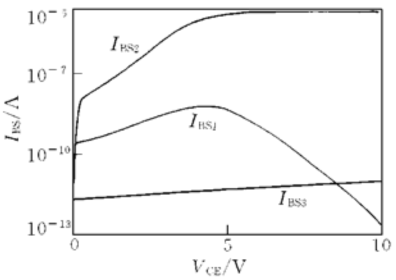

图 6 模拟的 I_{BS1}、I_{BS2}、I_{BS3} 曲线

FIG. 6 Simulated I_{BS}- V_{CE} Curves

I_{BS3} 的影响很小. 文献[1]没有模拟表面本征后的 I_{BS} 曲线, 这里作一下讨论, 表面本征时复合率最大(图中 V_{CE} 约 4.5V 处), 当 V_{CE} 继续增加, I_{BS1} 下降, 是因为表面反型后表面复合率下降所致. 而表面本征后 I_{BS2} 不下降, 这是因为模拟中表面复合速度 S 取了最大值的缘故.

从以上模拟过程和实验结果来看, 用电路模型中的受控电流源和受控电压源的形式来描述表面复合和体复合现象是可行的, 模拟与实验相比还存在小的误差, 文献[1]也报道了类似的误差, 说明不是电路模型的问题.

参 考 文 献

[1] R. E. Thomas, R. F. Haythornthwaite and W. A. Chin, IEEE Trans. Electron Devices, 1977, **24**(8): 1070—1076.

[2] 郑云光, 郭维廉, 李树荣, 电子学报, 1998, **26**(8): 105—106[ZHENG Yun-guang, GUO Wei-lian and LI Shu-rong, Acta Electronica Sinica, 1998, **26**(8): 105—106(in Chinese)].

[3] 郭维廉, 张培宁, 郑云光等, 电子学报, 1998, **26**(8): 107—110[GUO Wei-lian *et al*., Acta Electronica Sinica, 1998, **26**(8): 107—110(in Chinese)].

[4] 郭维廉, 半导体杂志, 1994, **19**(2): 42—47[GUO Wei-lian, Semiconductor Magazine, 1994, **19**(2): 42—47(in Chinese)].

[5] A. S. Grove, Physics and Technology of Semiconductor Device, John Wiley & Sons, New York, 1967.

[6] 刘恩科, 朱秉升, 半导体物理学, 北京, 国防工业出版社, 1979, 285[LIU Enke and ZHU Bingsheng, Semiconductor Physics, National Defence Industry Press, 1979, 285(in Chinese)].

[7] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, New York, John Wiley & Sons, New York, 1969.