

# 新型高频硅光电负阻器件的特性模拟及测试分析

朱胜利 姚素英 郑云光 李树荣 张世林 郭维廉

(天津大学电子信息工程学院 微电子系, 天津 300072)

**摘要:** 给出了达林顿  $\lambda$  型光电双极晶体管(DPLBT)的结构及其等效电路, 并以此等效电路为基础, 用 PSPICE 电路模拟程序对 DPLBT 的电学特性( $I_C-V_{CE}$ )进行了模拟, 对所研制的 DPLBT 器件进行了测试, 并对模拟和实验结果作了深入分析, 其  $I_C-V_{CE}$  特性与模拟结果符合得较好。研究发现 DPLBT 具有良好的特性和多种光电功能, 在光逻辑、光计算、光通信等领域中具有较好的应用前景。

**关键词:** 光电负阻器件; 光电双极晶体管; 模拟

**EEACC:** 2560; 2560B; 2560J

中图分类号: TN 32

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)05-0573-06

## 1 引言

自 1980 年 Wu 等人试制出  $\lambda$  型光电负阻双极晶体管(PLBT)以来<sup>[1]</sup>, 张培宁和郑云光等人相继对 PLBT 和达林顿  $\lambda$  型硅光电负阻双极晶体管(DPLBT)进行了研制和应用研究, 发现 DPLBT 具有光控电流开关、光控电流双稳态、光控正弦波振荡等多种功能和光灵敏度高、频率特性好等优点。它可用于光控电流开关、自动控制、光电耦合器、近红外光探测器、光信息处理和光通讯等方面。为进一步提高 DPLBT 的器件性能和拓宽其应用领域, 本文对 DPLBT 的器件性能作了模拟和测试分析研究。

## 2 DPLBT 的结构和等效电路

达林顿光电  $\lambda$  型双极晶体管是由两个光电  $\lambda$  型双极晶体管器件以达林顿结构相连形成的一种新型高频光电负阻器件。所研制的这种复合型光电负阻器件, 结构和工艺简单, 同常规的集成电路工艺共容性好, 因此易于集成。为了深刻理解该器件的机理, 我们先给出 PLBT 器件的结构。

### 2.1 PLBT 的结构

$\lambda$  型硅光电负阻晶体管是由一个光电双极晶体管( $n^+pn$ )和一个 n 沟增强型 MOS 管组合构成。其中 MOS 管的源、漏、栅极分别和双极管的发射极、基极、集电极相连, 双极管的 C-B 结是受光 p-n 结, 基极悬浮, 如图 1(a) 所示。该结构中光电晶体管是基区面积较大的双极管, 受光的 p-n 结由一个二极管和一个结电容  $C_J$  并联等效, 等效电路如图 1(b) 所示, 其中 npn 双极晶体管为主器件, n 沟 MOS-FET 为实现负阻特性的反馈器件。光电晶体管的基极仅与 MOS 管漏极相连, 而不与外电源连接。工作时 C 极接正电压, E 极接地。

### 2.2 DPLBT 等效电路及工作原理

DPLBT 的等效电路如图 2(a) 所示, 它是由输入管(PLBT 1)与输出管(PLBT 2)相连而成。DPLBT 的基极悬浮, 发射极接地, 集电极作为输出端。当  $V_{CE} < V_T$  (MOS 管的阈值电压) 时, MOS 管均处于关断状态, 漏极电流  $I_D = 0$ , 并且  $V_{CE}$  增加的初始阶段 PLBT 1 没有导通, 只有 PLBT 2 的双极管导通, 其基极的注入光电流  $I_{phb2}$  全部注入双极管, 随着

朱胜利 男, 1978 年出生, 硕士研究生, 目前从事半导体器件和集成电路的科研工作。

姚素英 女, 1947 年出生, 教授, 博士生导师, 目前从事半导体器件和集成电路科研和教学工作。

郑云光 男, 1935 年出生, 教授, 目前从事半导体器件和集成电路的科研和教学工作。

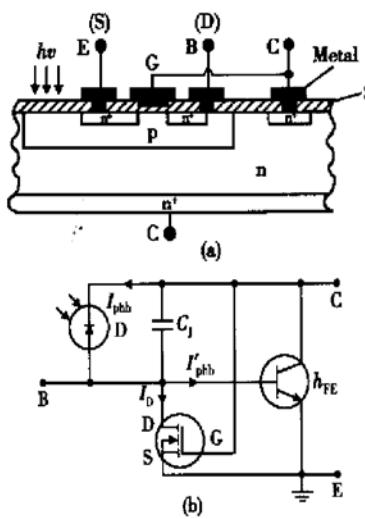


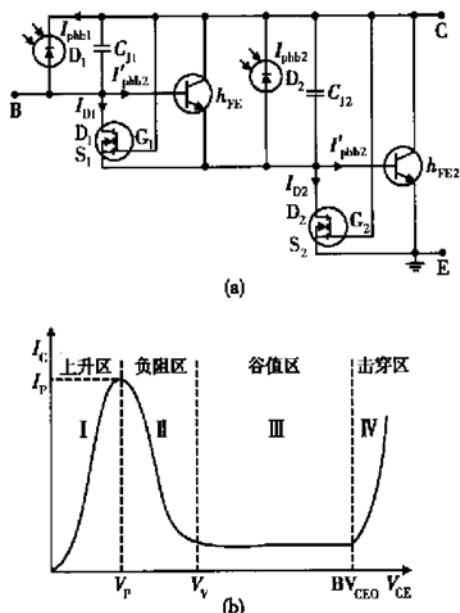
图 1 (a) PLBT 的器件结构;(b)等效电路

Fig. 1 (a) PLBT's device structure; (b) Equivalent circuit

$V_{CE}$ 的进一步增大, 双极管PLBT1开始导通, 输入管和输出管集电极光电流分别为:

$$I_{phc1} = (1 + h_{FE1})(I'_{phb1} + I_{chb1}) \approx h_{FE1}I'_{phb1} \quad (1)$$

$$I_{phc2} = (1 + h_{FE2})(I'_{phb2} + I_{chb2}) \approx h_{FE2}I'_{phb2} \quad (2)$$

图 2 DPLBT 的等效电路(a)和  $I_{phc}-V_{CE}$ 特性(b)Fig. 2 DPLBT's equivalent circuit (a) and  $I_c-V_{CE}$  characteristic (b)

此时双极晶体管工作在饱和区(或放大区), 对应于图 2(b)中的 I 区. 然而, 当  $V_{CE}$ 增大到  $V_{CE}=$

$V_{T1}(V_{T2})$ 时, 两个 MOS 管导通(后一级先导通),  $I_{D1}, I_{D2}$ 开始分流, 由于PLBT2的基极电流为:

$$I_{B2} = I_{E1} + I_{phb2} \quad (3)$$

故  $I_{D1} < I_{D2}$ , 所以实际有效的基极电流  $I'_{phb1} < I'_{phb2}$ , 且

$$I'_{phb1} = I_{phb1} - I_{D1} \quad (4)$$

$$I'_{phb2} = I_{B2} - I_{D2} \quad (5)$$

由(1)~(5)式得:

$$I_C = I_{phc1} + I_{phc2} \approx h_{FE2}(V_{CE}) \{ h_{FE1}(V_{CE}) [I_{phb1} - I_{D1}(V_{CE})] \} + h_{FE2}(V_{CE}) [I_{phb2} - I_{D2}(V_{CE})] \quad (6)$$

由此可以看出达林顿结构增大了输出电流. 当  $V_{CE}$ 继续增大时,  $I_{D1}$ 和  $I_{D2}$ 也随着增大, 使  $I'_{phb1}, I'_{phb2}$ 减小, 因此导致两个双极管集电极光电流  $I_{phc1}, I_{phc2}$ 随  $V_{CE}$ 增大而减小, 表现为图 2(b)中的负阻区 II 区. 最后, 当两个 MOS 管都完全导通时,  $I_{D1} = I_{phb1}, I_{D2} = I_{phb2} + I_{CEO1}, I'_{phb1} = I'_{phb2} = 0, I_C = I_{CEO} = I_{CEO1} + I_{CEO2}$ , 即是谷值区 III, 直到  $V_{CE}$ 达到击穿电压  $BV_{CEO}$ , 此即图 2(b)中的 IV 区. 以上即为达林顿硅光电  $\lambda$ 型双极晶体管出现负阻特性的机理. 简单地说, 光照产生的光注入电流使DPLBT的  $I_C$  随  $V_{CE}$ 增加, 而 MOS 管对基极电流的分流作用使基极电流减小, 导致器件输出电流下降, 这就是 DPLBT 负阻特性产生的原因.

### 3 器件的设计与研制

从器件设计方面考虑, 为提高PLBT的输出光电流  $I_{phc}$  和DPLBT的特征频率  $f_T$ , 我们做了结构参数和工艺参数的调整, 如适当选取双极管集电区电阻率  $\rho_c$  和厚度  $W_c$ , 并适当增大集电结面积  $A_c$ , 尽量减小发射结面积  $A_E$  和基区宽度  $W_b$ , 基区表面浓度  $N_{BS} \approx 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , MOS 管栅氧化层厚度  $t_{ox} \approx 0.12 \mu\text{m}$ , 并根据具体情况作参数之间的折中考虑. 最后所设计版图如图 3 所示, 其中六个源、漏区并联放在  $200\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  的 p 型区里, 与 n 型衬底组成输入管, 其基极(也是漏区)作为复合管(DPLBT)的基极, 而栅极作为复合管(DPLBT)的集电极, 用内引线将其发射极与输出管的基极相连; 三个源、漏区并联放在  $80\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$  的 p 型基区里, 与 n 型衬底组成输出管, 栅极与衬底相连, 发射极作为复合管(DPLBT)的发射极. 由于在工艺过程中, 从基区到 n 型衬底存在铝引线爬坡现象, 故加宽了该处的引线宽度从而减小爬坡电阻以减小电迁移失效. 为适

应较大的输出电流,复合管(DPLBT)中输出管发射极的引线设计得比较宽。研制结果表明,DPLBT 的峰值电流和特征频率性能都较好,  $I_P \geq 10\text{mA}$ ,  $f_T \geq 220\text{MHz}$ 。

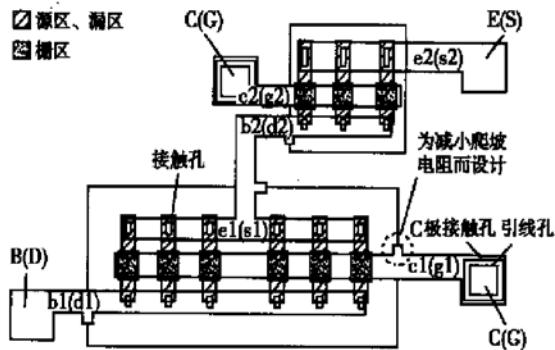


图 3 DPLBT 示意图

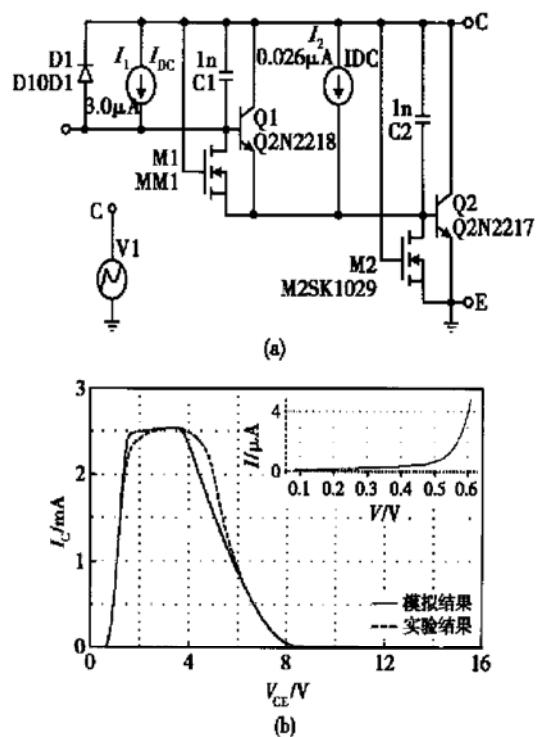
Fig. 3 DPLBT's layout

## 4 DPLBT 特性的模拟分析和测试

### 4.1 DPLBT 特性的模拟分析

由图 2(a)的电路可知,DPLBT 实际上是一种集成器件,器件的整体特性应等效于各个分离器件按照图 2(a)连接起来的电路特性。DPLBT 的光电负阻特性可以利用 PSPICE 电路模拟程序进行模拟。在模拟中,双极晶体管采用的是 Gummel-Poon 静态模型,它考虑了低电流效应、大注入效应、基区宽度调制效应等;n 沟增强型 MOS 管采用二级静态模型,它在一极静态模型的基础上考虑了器件几何尺寸的减小对 MOSFET 直流特性的影响。这样的器件模型使得模拟结果更贴近我们的实验结果。模拟电路图如图 4(a)所示,其中利用一个恒流源代替了 B-C 结因光照产生的注入光电流  $I_{phb}$ ,采用的各项电学参数如下:三极管:  $\beta = 60 \sim 90$ ; n 沟增强型 MOS 管:  $V_T = 1 \sim 1.5\text{V}$ ; 直流扫描电源为 10V(或 20V); 恒流源  $I_{phb}$  是设定的自变量。由此来观察其输出特性,以分析该器件的光电特性。因为我们设计的 DPLBT 输入管基区面积(受光面积)较大,所以在模拟时器件的光电流主要由输入管的光电流来提供,而输出管的光电流很小。当  $I_{phb} = 3\mu\text{A}$  时,对该电路进行模拟,得到它的输出特性结果如图 4(b)所示(横轴表示输出电压  $V_{CE}$ ,纵轴表示输出电流  $I_C$ )。从图中可以看到,当输出电压  $V_{CE}$  从 0 开始增加时,Q2 管开始导通,该管处在饱和区,由于注入电流很

小,对应的 Q2 管  $\beta$  值也较小,使得电流随电压上升而很缓慢地增大(由图 4(b)中右上角的小图可以看出);当  $V_{CE}$  达到 0.7V 左右时,Q1 管开始导通,进入饱和区,由于该管注入电流较大,其输出电流作为 Q2 管的注入电流,于是随电压  $V_{CE}$  的增大 DPLBT 输出电流迅速增大;当电压  $V_{CE}$  到达 M2 管的阈值电压  $V_{TO2} = 1.3\text{V}$  时,M2 管开始导通,于是 Q2 管的注入电流被分流,随电压  $V_{CE}$  的增大输出电流增大减缓;当电压  $V_{CE}$  增大到 2.0V 时,M1 管开始导通,对 Q1 管的注入电流进行分流,同时也使 Q2 管的注入电流减小,所以随电压  $V_{CE}$  的增大输出电流增大进一步减缓;当 M1 管和 M2 管的分流作用超过 Q1 管和 Q2 管的输出电流随  $V_{CE}$  增加而呈现上升趋势时,这时  $V_{CE}$  增大  $I_C$  不再增加反而开始减小,从而出现负阻现象。当 M1 管和 M2 管完全导通而 Q1 管和 Q2 管截止时,电路的输出特性进入谷值区。另外,图 4(b)中,模拟结果和实验结果可做到上升段、峰值电流电压值、谷值电流电压值一致。但与大电流段的形状仍有偏离,原因是所选用器件模型参数与实际器件的参数之间仍存在差别。

图 4 DPLBT 的 PSPICE 电路模拟图(a)及输出特性( $I_{phb}-V_{CE}$ )(b)Fig. 4 DPLBT's simulation circuit for PSPICE (a) and  $I_C-V_{CE}$  characteristic (b)

在模拟过程中, 改变注入电流  $I_{phb}$ ( 在图中为  $I_L$ ) 的大小, 发现随着注入电流的增大, 峰值电流和峰值电压近似线性增大, 而且峰值电流随注入光电流的变化幅度要比峰值电压大, 如图 5 所示. 我们还模拟了 MOS 管的阈值电压对峰值电压和峰值电流的影响, 如图 6 所示. 其中 M1 管的阈值电压对峰值电压的影响较大, 基本上呈线性关系, 但对峰值电流的影响不大. 与之相反, M2 管的阈值电压对峰值电流影响较大而对峰值电压的影响较小. 这主要是因为 M2 管比 M1 管先导通. M2 管开始导通( $V_T = 1.3V$ )时, Q1, Q2 管已导通, 且 Q1 管仍处于饱和态工作,  $I_C$  随  $V_{CE}$  增加而快速上升, 所以 M2 管导通对  $I_C$  上升的抑制作用较大, 它对  $I_P$  值大小起决定作

用. M1 的导通进一步抑制  $I_C$  上升并促使  $I_C$  很快开始下降, 因此 M1 管导通对  $I_P$  值影响相对较小, 而对  $V_P$  值大小起决定作用. 其它还有很多影响器件性能的因素, 例如: 双极管的  $A_c$  或  $h_{FE}$  增加, 在光强不变时, 会引起  $I_P$  增加; MOS 管的跨导或沟道宽长比增加也会导致  $V_P$  和  $I_P$  减小, 这和(6)式是一致的. 此外, 双极管的  $I_{CBO}$  的大小显著地影响 DPLBT 的  $I_C$  开始快速上升对应的  $V_{CE}$  值. 这也可以从(2), (6)式中得到解释(由于篇幅有限, 数据略去). 通过模拟分析, 我们得到了该器件的各种参数与其性能之间的联系, 对于我们更深入地了解器件的性能具有很大的作用.

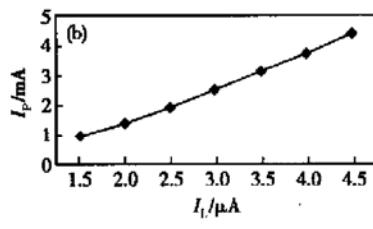
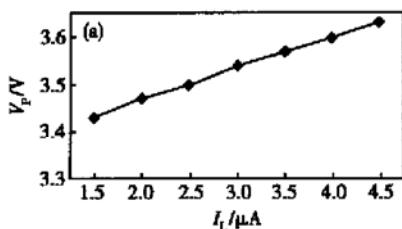


图 5 DPLBT 的峰值电压(a)和峰值电流(b)随注入光电流变化模拟曲线  $I_{phb1} = 3 \mu\text{A}$

Fig. 5 DPLBT's peak voltage and peak current change with different photocurrent  $I_{phb1} = 3 \mu\text{A}$

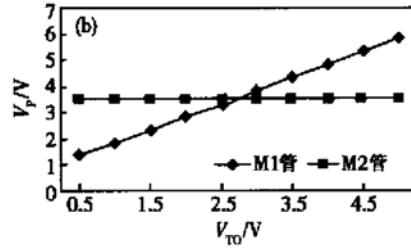
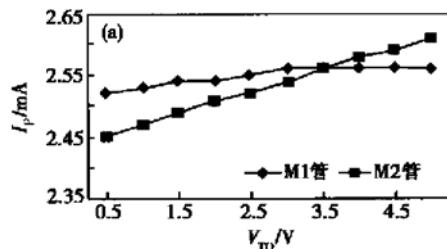


图 6 MOS 管的阈值电压对  $V_P$  和  $I_P$  的影响  $I_{phb1} = 3 \mu\text{A}$

Fig. 6 MOSFET's threshold voltage impact peak voltage  $I_{phb1} = 3 \mu\text{A}$

#### 4.2 DPLBT 特性的测试

对所制作的器件进行测试, 实验结果如图 7 所示, 当光强分别为 2000, 3000, 4000lx 时, 随光强增大峰电流和峰值电压都随之增大. 对图 7 和图 8 可作如下分析: 当光强较小时, C-B 结产生的注入光电流  $I_{phb}$  比较小, 这时主要受到小电流效应的影响, 双极管  $h_{FE}$  较小, MOS 管分流影响相对较大, 因此, 随着光强增大, 光生电流  $I_{phb}$  增大, npn 管基极电流  $I'_{phb1}$  增大, 但集电极电流  $I_C$  (或峰值电流  $I_P$ ) 增大比较缓慢(如图 8(b) 中  $E < 2000\text{lx}$  的情况). 当注入电

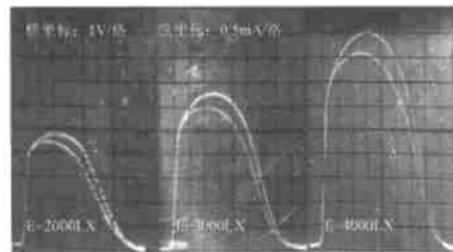


图 7  $V_P$  和  $I_P$  随注入光电流增加的实验结果

Fig. 7 Peak voltage and peak current increase for inject photocurrent's increasing

流较大时,由于双极管处于正常放大值范围,而且 $h_{FE}$ 随注入光电流变化不大,这时 $I_C$ 较大,受MOS管的分流影响相对较小,因此, $I_C$ (或 $I_P$ )随光强度增加而上升较快,近似线性关系,如图7和图8(b)中 $E > 2000lx$ 的情况。 $V_P$ 随光强度变化的原因也和 $I_P$ 的情况类似。图5中的情况就和光注入电流较大时的情况相似。对比图5和图8可看出,我们得到的模拟结果与实验结果符合得较好。

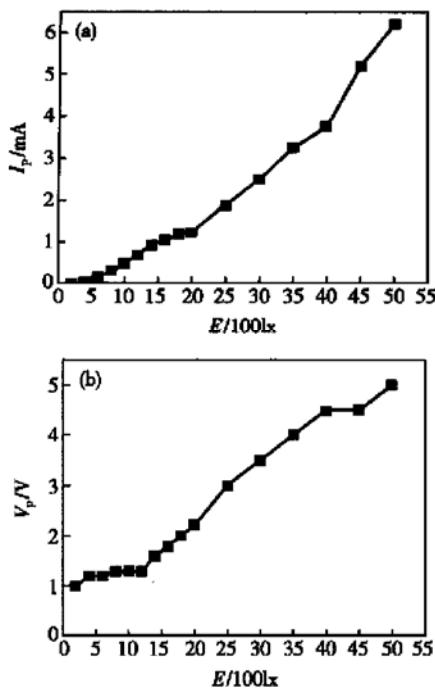


图8 DPLBT的峰值电流(a)和峰值电压(b)随光强变化实验曲线

Fig. 8 DPLBT's peak voltage and peak current change with different optical intensity

## 5 总结

本文给出所研制的达林顿光电λ型双极晶体管(DPLBT)  $I_C-V_{CE}$  表示式及其等效电路,并用PSPICE 电路模拟程序模拟了DPLBT 的  $I-V$  特性、 $I_P(V_P)-I_L$  特性和  $I_P(V_P)-V_{TO}$  特性,详细分析了DPLBT 负阻特性产生机理及有关特性曲线。所做实验验证了  $I_P(V_P)$  随  $I_L$  的变化关系,模拟和实验结果基本一致。本文对DPLBT 的分析研究将有助于该器件的性能进一步提高以及更好地开发利用。

## 参考文献

- [1] Wu Chingyuan, Wu Chungyu, Sheng Hongdah. A new photo-sensitive voltage-controlled differential negative resistance device—The Lambda bipolar photo-transistor. IEEE Electron Device Lett, 1980, EDL-1(5): 81
- [2] Zhang Peining, Guo Weilian, Zhang Yimo, et al. The integrated Si photo negative resistance device and application. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(5): 424 (in Chinese) [张培宁, 郭维廉, 张以模, 等. 集成型硅光电负阻器件及应用研究. 光子学报, 1999, 28(5): 424]
- [3] Zheng Yunguang, Zhang Shilin, Sha Yanan, et al. Fabrication of DPLBT high frequency silicon photo-negative resistance device. Semiconductor Optoelectronics, 2002, 23(1): 162 (in Chinese) [郑云光, 张世林, 沙亚男, 等. DPLBT型高频硅光电负阻器件的研制. 半导体光电, 2002, 23(1): 162]
- [4] Zhang Shengcai, Zheng Yunguang, Guo Hui, et al. A device model of photoelectric dual base transistor. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(5): 790 (in Chinese) [张生才, 郑云光, 郭辉, 等. 光电双基区晶体管(PDUBAT)的器件模型. 电子学报, 2003, 31(5): 790]

## Characteristic Simulation and Test Analyses of Darlington Photo-Lambda Bipolar Transistor

Zhu Shengli<sup>1</sup>, Yao Suying, Zheng Yunguang, Li Shurong, Zhang Shilin and Guo Weilian

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

**Abstract:** The structure and equivalent circuit of photo-negative resistance device——Darlington photo-Lambda bipolar transistor(DPLBT) are introduced. The electric characteristic( $I_C-V_{CE}$ ) of DPLBT is analyzed by the program of PSPICE circuit simulation at the base of the equivalent circuit. The laboratorial device—DPLBT is tested and the test results agree with simulation results on electric characteristic. The test results and the simulation results are analyzed further. It is found that DPLBT can be extended into the area of optical logic, the optical computing, and the optical communication for its favorable characteristic and photoelectric functions in the future.

**Key words:** photo-electronic negative resistance device; DPLBT; simulation

**EEACC:** 2560; 2560B; 2560J; 4250

**Article ID:** 0253-4177(2004)05-0573-06

Zhu Shengli male, was born in 1978, graduate student. He is engaged in research on the Si photoelectronic negative resistance device and IC Design.