

# 基于双基区晶体管结构的光控振荡器

卜春雨 李树荣 吴 静 李 丹

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 采用 DUBAT(双基区晶体管)和光电二极管构成新型无电感光控振荡器, 并对其等效电路进行了模拟, 分析了工作原理。实验数据证明了该光控振荡器频率与光强成正比, 可实现光的模数转化。由于 DUBAT 结构简单, 与集成电路工艺兼容, 成本低廉, 为光控振荡器与功能电路的集成应用提供了新的实现方式。

**关键词:** 振荡器; 光电双基区晶体管; 光控调频; 光控振荡; 光电转换

PACC: 7220      EEACC: 1230B; 2560; 4250

中图分类号: TN 752      文献标识码: A      文章编号: 0253-4177(2004)09-1164-05

## 1 引言

振荡器在电子线路中应用广泛。通常由负阻器件构成的振荡器电路必须包含电容、电感、电阻等元件, 但在集成电路工艺中电感不易制作, 因而限制了该类型振荡器在集成电路中的应用。2000 年沙亚男等人<sup>[1]</sup>用 PDUBAT(光电双基区晶体管)和电阻(无电感)构成振荡器, 夏克军等人<sup>[2]</sup>后又通过电路模拟和实验证明 PDUBAT 是振荡器而不是负阻器件。因 PDUBAT 是由晶体管和光电二极管构成的, 且二者之间距离很近, 光信号不可能只照到光电二极管而不影响晶体管, 晶体管受光后成为光电晶体管, 其产生的光电流叠加在振荡器输出电流上, 造成振荡器输出电流增加电压减少, 这使光强转化为脉冲振荡频率时线性度不好。为克服上述缺陷, 本文使用与双基区晶体管(DUBAT)并联的光电二极管单独受光, 分析了其工作原理, 给出了电路连接, 对等效电路进行了电路模拟, 其结果与实验结果相符, 光强和脉冲振荡频率线性度较好这一结论得到证明。

## 2 基于 DUBAT 结构的光控振荡器

### 2.1 PDUBAT 器件结构

图 1 给出了 PDUBAT 器件结构剖面图。它由靠

得很近的具有大面积感光结的光电二极管 D(由 p<sub>1</sub> 区、n<sub>1</sub> 区构成)和一个用于输出的 NPN(由 n<sub>2</sub> 区、p<sub>2</sub> 区、n<sub>1</sub> 区构成)晶体管组成, 二者的相邻区域是耦合区<sup>[3]</sup> F。其中 D 分为两部分: 靠近 F 区的部分记作 D<sub>L</sub>, 其余部分记作 D<sub>B</sub>(其结电容记作 C<sub>B</sub>)。NPN 管也分为两部分, 靠近 F 区的横向部分记作 NPN<sub>L</sub>, 其余部分记作 NPN<sub>B</sub>。其中从 n<sub>2</sub><sup>+</sup> 区和 n<sub>1</sub> 区分别引出 PDUBAT 的发射极和集电极, p<sub>1</sub> 区引出基极。D<sub>B</sub> 结与衬底之间的电阻记作 R<sub>bp</sub>, NPN<sub>B</sub> 管集电极电阻记作 R<sub>bo</sub>, F 区与衬底之间的纵向体电阻记作 R<sub>be</sub>(该电阻阻值相对 R<sub>bp</sub> 和 R<sub>bo</sub> 阻值较大)。p<sub>1</sub> 区、n<sub>1</sub> 区、p<sub>2</sub> 区构成横向 PNP 管。

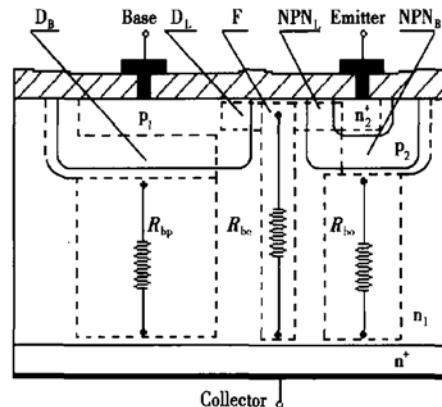


图 1 PDUBAT 结构剖面图

Fig. 1 Profile of PDUBAT structure

卜春雨 男, 1979 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。

吴 静 男, 1978 年出生, 硕士研究生, 从事半导体新型材料和 VLSI 研究。

2003-09-19 收到, 2003-12-02 定稿

© 2004 中国电子学会

## 2.2 PDUBAT 振荡器的工作原理

### 2.2.1 PDUBAT 输出特性<sup>[4]</sup>

图 2 给出了在 JT-1 晶体管特性图示仪上拍摄到的 PDUBAT 的  $I-V$  特性曲线(实验中, 光照 PDUBAT, 其基极悬空, 集电极接偏压  $V_{ce}$ , 发射极接地). 由图可见, 输出电流  $I_c$  随  $V_{ce}$  的增大先逐渐增大, 当  $V_{ce}$  超过某值  $V_p$ (起振电压)后,  $I_c$  发生振荡. 整条曲线可分为上升区和振荡区. 现象成因在文献[2]中已有明确阐释, 此处不再赘述.

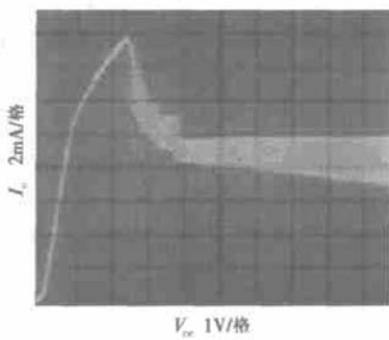


图 2 PDUBAT 的输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristics of PDUBAT

### 2.2.2 由 PDUBAT 构成的振荡器工作原理<sup>[2~5]</sup>

在 PDUBAT 的集电极和电源  $V_{ce}$  之间串接电阻  $R_L$ , 发射极接地, 基极悬空, 这样构成振荡器. 图 3 给出了其集电极电压振荡波形, 成因分析如下:

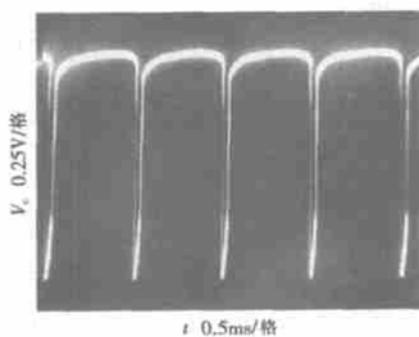


图 3 集电极电压振荡波形

Fig. 3 Voltage oscillated waveform of collector

无光照时, 器件内部无电流, 故耦合区电位  $V_f$  和集电极电位  $V_c$  均为电源电压  $V_{ce}$ .

光(其光强超过阈值光强<sup>[3]</sup>, 所谓阈值光强, 即可令器件发生振荡的最小光强)照器件表面后, 大面积感光结  $p_{in}$  产生光生电流  $I_L$  并主要用于结电容  $C_B$  的充电使  $p_1$  区电位  $V_{pl}$ (即光生电压)相对于  $V_c$

升高. 随着  $V_{pl}$  的升高,  $p_{in}$  结正偏逐渐加大, 光生空穴便有一小部分通过  $D_L$  注入到 F 区, 并被 NPN 管的集电结收集<sup>[2]</sup>, 与 NPN 管自身的光生电流一同构成其基极电流, 使 NPN 管电流增加, 集电极电位  $V_c$  下降, NPN 管向 F 区注入电子流也增加, 其中的一部分在 F 区与空穴复合或注入到 PNP 管的发射区形成 PNP 管基极电流, 剩下的部分电子在衬底至 F 区电场的作用下向衬底漂移形成 PDUBAT 集电极电流的一部分, 在通过  $R_{bc}$  时产生压降, 造成  $V_f$  相对  $V_c$  开始降低.  $V_f$  降低使  $D_L$  正偏进一步加大, 这导致空穴主要通过  $D_L$  而不是  $D_B$  注入  $n_1$  区, 进而引发 PDUBAT 进入耦合态<sup>[4]</sup>(即大量空穴通过  $D_L$  注入到 F 区致使 PNP 管、NPN<sub>L</sub> 管和  $R_{bc}$  形成正反馈的状态),  $C_B$  开始放电(即  $D_B$  正偏减弱), 大量空穴通过  $D_L$  注入到 F 区, 进而形成 NPN 管的基极电流, 相应地, NPN<sub>L</sub> 管也向 F 区注入更多的电子, 通过  $R_{bc}$  时产生更大的压降,  $V_f$  相对  $V_c$  进一步下降, 这是个正反馈的过程. 正因为存在正反馈机制,  $V_f$  和  $V_c$  下降非常迅速. 此时  $V_c$  波形对应图 3 中每个脉冲的下降沿.

由于  $C_B$  的延时作用, 开始  $V_{pl}$  相对于  $V_f$  下降不多, 但因  $V_f$  快速下降, 使  $D_L$  两侧压差很快增大, 由二极管  $I-V$  特性可知, 当  $D_L$  偏压达 0.8V 左右以后, 电压增量很小, 所以  $V_{pl}$  会跟随  $V_f$  一同下降,  $C_B$  放电速度加快直至零偏甚至反偏. 其间,  $V_c$  和  $V_f$  也会下降到各自的最低点. 该  $V_c$  对应图 3 中脉冲下降沿最低点.

此后, 通过  $D_L$  注入到 F 区的空穴流迅速减少, 这使 NPN 管电流减少,  $V_c$  回升, NPN 管向 F 区注入的电子流相应减少,  $R_{bc}$  上的压降减小,  $V_f$  相对  $V_c$  开始升高, 致使  $D_L$  正偏开始减弱, 通过它注入到 F 区的空穴进一步减少, NPN<sub>L</sub> 注入到 F 区的电子随之继续减少,  $V_f$  相对  $V_c$  继续回升, 这也是正反馈的过程. 亦因存在正反馈机制,  $V_c$  和  $V_f$  升高迅速. 该  $V_c$  波形对应图 3 中每个脉冲的上升沿. 同样因  $C_B$  存在延时作用,  $V_{pl}$  升高速度远没有  $V_c$  和  $V_f$  快, 故  $D_L$  接近零偏而截止.

接下来,  $I_L$  又开始给  $C_B$  充电(所需要的时间比放电时间要长得多, 这是影响频率高低的主要原因), PDUBAT 退出耦合态.  $V_c$  和  $V_f$  升高至  $V_{ce}$  并保持, 直到  $V_{pl}$  相对  $V_c$  升高至足够开启  $D_L$ , 引发新一轮耦合态. 这对应图 3 中每个脉冲顶部的平坦部分.

### 2.3 基于 DUBAT 结构的光控振荡器

#### 2.3.1 振荡器的电路连接

新结构的光控振荡器为克服 NPN 管所存在的寄生光电流, 以光电二极管单独受光, 其电路连接如图 4 所示。其中  $V_{cc}$  为外接电源;  $Q$  为 DUBAT;  $D_E$  是光电二极管, 其 p 端接 DUBAT 的基极, n 端接电源正极;  $R_L$  为集电极负载电阻;  $C_{ext}$  为外接电容(其值远大于  $p-n-p$  结电容  $C_B$ , 目的主要是为了在实验时降低频率, 以便读数。其实, 不加电容一样可以起振, 但频率过高。其频率的调整可以在集成电路的制作过程中, 通过控制  $D_B$  结的结面积来做到)。

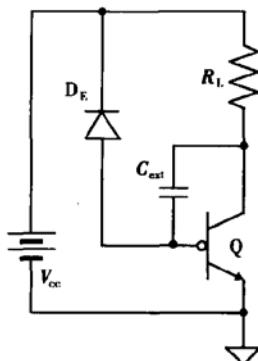


图 4 振荡器电路连接

Fig. 4 Circuit for the oscillator

#### 2.3.2 基于 DUBAT 结构光控振荡器的工作原理

用 DUBAT 构成的光控振荡器, 其工作原理与 PDUBAT 振荡器工作原理大体相同, 但也有区别。工作时, DUBAT 不受光照, 而仅由  $D_E$  受光产生电流  $I_L$  注入 DUBAT 基区, 这样 NPN 管无法产生寄生光电流; 此外, 光强一定, 光电二极管  $D_E$  的光生电流基本恒定, 这使  $D_E$  起到了恒流源的作用。而 PDUBAT 的大面积感光结与光电池类似, 其光生电流和  $pn$  结上的电压有关。通过 SPICE 软件模拟得到的集电极电压振荡波形如图 5 所示, 这和从示波器拍摄到的振荡波形(见图 3)基本一致。

## 3 实验

由光电二极管的光特性可知, 光生电流  $I_L$  近似与光强  $P_L$  成正比, 即:

$$I_L = \eta P_L \quad (1)$$

其中  $\eta$  为光电转换效率因子。实验测得的  $P_L-I_L$  曲线如图 6 所示(图中近、中、远表示光探测头距离光源位置不同), 从图中可见  $I_L$  和  $P_L$  满足较好的线性关系。

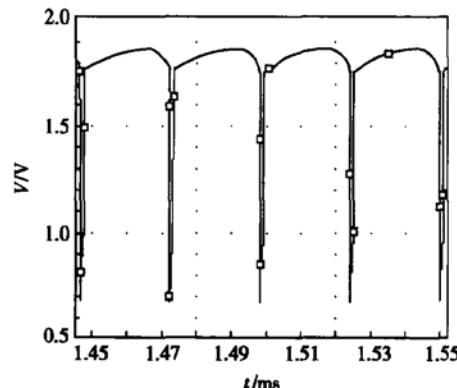


图 5 模拟集电极电压振荡波形

Fig. 5 Simulated voltage oscillated waveform of collector

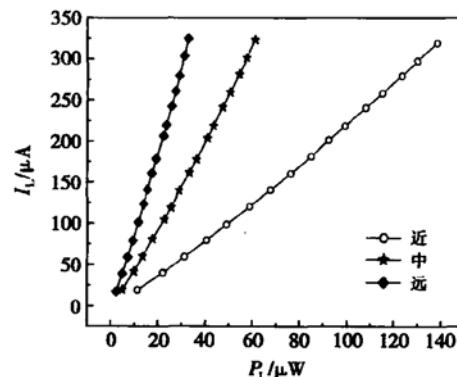
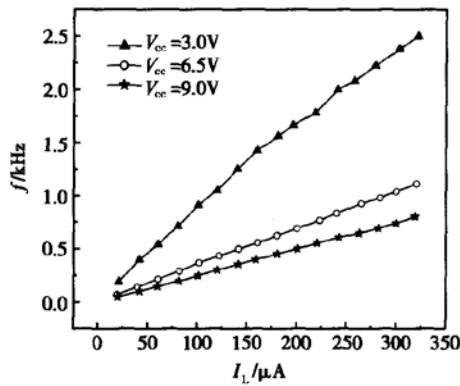


图 6  $P_L-I_L$  关系曲线

Fig. 6 Curves of  $P_L-I_L$

图 7 给出了实验中检测到  $D_E$  支路的光电流  $I_L$  与振荡频率  $f$  的关系曲线。图中,  $f$  随  $I_L$  的增大而增大, 这是因为  $I_L$  增大后,  $C_{ext}$  和  $C_B$  充电时间缩短的缘故(其中,  $C_{ext}$  起主要作用), 并且  $f$  与  $I_L$  有较好的线性关系(可对照文献[1]的图 7 分析)。

图 7 中的  $R_L$  取定值  $21.4\Omega$ ,  $V_{cc}$  分别取  $3.0, 6.5$  和  $9.0V$ 。该图表明:  $R_L$  和  $I_L$ (即  $P_L$ ) 一定时, 随  $V_{cc}$  降低,  $f$  升高。这是因为  $V_{cc}$  降低使集电极最大电流变小(相对于  $V_{cc}$  值较大时), NPN 管电流由小到大区间变小, 导致器件正反馈程度变弱,  $C_{ext}$  和  $C_B$  放电不完全, 因  $I_L$  给  $C_{ext}$  和  $C_B$  充电是在这个基础上进行

图 7  $R_L$  一定时的  $I_L-f$  曲线Fig. 7 Curves of  $I_L-f$  with unchanging  $R_L$ 

的, 充电时间相应缩短,  $f$  升高. 此外, 从图中还可以看出, 随着  $V_{ce}$  的降低曲线会偏离线性, 这是因为  $V_{ce}$  降低导致  $f$  升高后, PNP 管导通放电的时间在整个振荡周期中所占的比率变大, 已不能忽略.

## 4 讨论

我们在实验中发现光强太强或太弱都不能使振荡器起振. 分析如下:

在  $NPN_L$  管注入 F 区的电子流中, 有一部分构成横向 PNP 管的基极电流(在 F 区与空穴复合或注入  $p_i$  区), 设该分量与  $NPN_L$  管注入到 F 区的总电子流之比为  $\gamma$ , 则正反馈倍增因子  $K = \gamma \beta_{NPN_L} \beta_{PNP}$ , 其中,  $\beta_{NPN_L}$  和  $\beta_{PNP}$  分别为  $NPN_L$  管、PNP 管的有效电流放大倍数, 二者都是晶体管集电极电流的函数.

当  $NPN_L$  管注入 F 区电流有增量  $\Delta i$  时, 经过正反馈机制后, 一次增量为  $K \Delta i$ , 二次增量为  $K^2 \Delta i$ , ..., 总电流增量  $\Delta I = \Delta i + K \Delta i + K^2 \Delta i + \dots$ . 当  $K < 1$  时,  $\Delta I$  级数收敛, 由正反馈性质可知, 振荡极其微弱或根本无法起振; 当  $K > 1$  时,  $\Delta I$  级数发散, 振荡有明显的振幅. 可见,  $K = 1$  是起振临界条件. 其中,  $p_{in}$  结电容不停地被充放电并总有返回平衡点的趋势是振荡的起因.

弱光下, 光电二极管的光生电流  $I_L$  很微弱, 这使 PNP 管、 $NPN_L$  管的工作电流很小, 由此得  $\beta_{NPN_L}$  和  $\beta_{PNP}$  过小,  $K < 1$ , 器件不能起振.

强光时, 光电二极管的光生电流  $I_L$  很大, 致使 PNP 管、 $NPN_L$  管的工作电流很大, 此时  $\beta_{NPN_L}$  和  $\beta_{PNP}$  亦下降,  $K < 1$ , 器件不起振.

## 5 $P_L-f$ 关系的推导

实验证明, 该型振荡器的脉冲振荡频率与光强有很好的线性度, 下面定量推导光强与振荡频率的关系.

振荡周期有两部分, 一是  $I_L$  给  $C_B$  充电的时间; 另一是  $C_B$  在振荡器进入耦合态后通过  $D_L$ ,  $NPN_L$  和  $R_{bc}$  的正反馈机制放电的时间, 因其相对于  $C_B$  充电的时间短到可以忽略不计, 故可将振荡周期  $T$  视作仅由充电时间构成. 将  $V_{pl}$  视为时间的函数, 记作  $V_{pl}(t)$ . 设充电起始时间为  $t_1$ , 截止时间为  $t_2$ , 则  $T = t_2 - t_1$ . 由容压关系, 有:

$$I_{in} = C_B \frac{dV_{pl}(t)}{dt} \quad (2)$$

对(2)式整理并积分, 得:

$$\int_{t_2}^{t_1} dV_{pl}(t) = \frac{I_{in}}{C_B} \int_{t_2}^{t_1} dt \quad (3)$$

即:

$$\begin{aligned} V_{pl}(t_2) - V_{pl}(t_1) &= \frac{I_{in}}{C_B} (t_2 - t_1) \\ &= \frac{I_{in}}{C_B} T = \frac{I_{in}}{C_B} \times \frac{1}{f} \end{aligned}$$

进而, 得:

$$f = \frac{I_{in}}{C_B} \times \frac{1}{V_{pl}(t_2) - V_{pl}(t_1)} \quad (4)$$

式中  $f$  为脉冲振荡频率. 如前所述, 光电二极管的光生电流与光强有近似的线性关系, 即  $I_L = \eta P_L$ , 又  $I_{in} = I_L - I_F$ (其中,  $I_F$  为正向扩散电流), 因光电二极管  $D_E$  反偏因而可忽略  $I_F$  的影响, 近似有  $I_{in} = I_L = \eta P_L$ , 将其代入(4)式, 得:

$$f = \frac{\eta P_L}{C_B} \times \frac{1}{V_{pl}(t_2) - V_{pl}(t_1)} \quad (5)$$

式中  $V_{pl}(t_2) - V_{pl}(t_1)$  为常数(即 pn 结导通压降). 光强和振荡频率的线性关系在上式中得到了证明.

## 6 结论

本文采用光电二极管和 DUBAT 构成新型光控振荡器, 相对 PDUBAT 结构的光控振荡器而言, 改善了光强和脉冲振荡频率的线性度, 并得到实验和模拟结果证明. 因 DUBAT 结构简单, 工艺与双极工艺兼容, 为振荡器结合功能电路的集成带来了方便, 故可降低成本. 该型振荡器可完成光控调频,

使用方便,控制简单,为未来振荡器在系统集成及自动控制领域中的应用提出了一种新型简洁的可行性方案.

## 参考文献

- [ 1 ] Sha Yanan, Li Shurong, Guo Weilian, et al. Experimental investigations into PDUBAT light controlled pulse oscillators. Microelectronics, 2001, 30(1): 11 (in Chinese) [ 沙亚男, 李树荣, 郭维廉, 等. PDUBAT 光控脉冲振荡器的实验研究. 微电子学, 2001, 30(1): 11]
- [ 2 ] Xia Kejun, Li Shurong, Li Dan, et al. On study of the principle of photoelectric dual base transistor. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8): 850 (in Chinese) [ 夏克军, 李树荣, 李丹, 等. 光电双基区晶体管(PDUBAT)工作机理的研究. 半导体学报, 2003, 24(8): 850]
- [ 3 ] He Mincai, Zhong Zhe, Chen Bingruo, et al. Characteristics of photonegative resistance in indirect coupling photodetecting structure. Chinese Journal of Semiconductors, 1991, 12(10): 637 (in Chinese) [ 何民才, 钟哲, 陈丙若, 等. 间接耦合光电探测器结构的光致负阻特性. 半导体学报, 1991, 12(10): 637]
- [ 4 ] 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]
- [ 5 ] Zheng Yunguang, Zhang Shilin, Guo Weilian, et al. Discussion on the physical model in photoelectric dual base transistor. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(8): 1123 (in Chinese) [ 郑云光, 张世林, 郭维廉, 等. 光电双基区晶体管(PDUBAT)的物理模型探讨. 电子学报, 2001, 29(8): 1123]

## Photo-Controlled Oscillator Based on DUBAT

Bu Chunyu, Li Shurong, Wu Jing and Li Dan

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

**Abstract:** A novel photo-controlled oscillator (PCO) without inductances is constructed with photoelectric diode and DUBAT (dual base transistor). Simulation based on the equivalent circuit is run and the operating mechanism is analyzed. This PCO can realize the analog-digital transformation from photo to frequency signal as its photo intensity and frequency signal are in direct proportion. The novel PCO is a promising option for combination of PCO with functional circuits on a single silicon chip because of the simplicity of the structure of DUBAT, the much cheaper cost, the facility of fabrication and the compatibility of silicon technology.

**Key words:** oscillator; photoelectric dual base transistor; photo-controlled frequency modulation; photo-controlled oscillation; photo-electricity transformation

**PACC:** 7220      **EEACC:** 1230B; 2560; 4250

**Article ID:** 0253-4177(2004)09-1164-05

Bu Chunyu male, was born in 1979, master 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.

Wu Jing male, was born in 1978, master candidate, working with novel semiconductor device and R&D of VLSI.