

# 基于 DUBAT 的新型压控振荡器研究

吴 静, 李树荣, 夏克军, 郑云光, 郭维廉

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘 要: 本文首次研制了一种基于双基区晶体管(DUBAT)的无电感新型压控振荡器(VCO). 文中详细分析了其工作原理, 并给出了它的等效电路, 模拟结果与实验结果是一致的. 由于 DUBAT 结构简单, 工艺与双极集成电路工艺完全相容, 从而为压控振荡器结合其它功能电路的大规模集成提供了一种新的实现方式.

关键词: 振荡器; 晶体管; 等效电路; 正反馈; 模拟电路

中图分类号: TN303, TN75 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2004) 05-0792-04

## Study on a Novel Voltage Controlled Oscillator Based on DUBAT

WU Jing, LI Shu2rong, XIA Ke2jun, ZHENG Yun2guang, GUO Wei2lian

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

Abstract: A novel Voltage Controlled Oscillator (VCO) without inductances has been fabricated for the first time based on Du2al Base Transistor (DUBAT). The operating mechanism is analyzed in detail and the equivalent circuit is proposed. The results simulated by SPICE are consistent with those of experiments. The features of the simplicity of DUBAT structure and the compatibility of bipolar integrating process make this novel VCO a promising candidate for combination of VCO with functional circuits on a single silicon chip.

Key words: oscillator; transistor; simulation; positive feedback; equivalent circuit

### 1 引言

压控振荡器可以将电压信号转变为相应的频率信号, 在信号的采集与传输以及锁相环路等领域中有着极其广泛的应用. 传统的压控振荡器是利用变容二极管作为压控元件结合一些典型的振荡电路制作而成, 工艺复杂, 成本较高. 利用双基区晶体管(DUBAT)的负阻特性可以制成压(流)控振荡器, 但是需要外加电感作为储能元件, 其工作原理与隧道二极管多谐振荡器相似<sup>[1]</sup>. 在集成电路中电感不便于制作, 所以利用双基区晶体管的负阻特性结合电感制成的振荡器不便于集成. 沙亚南等发表文章指出光电双基区晶体管(PDUBAT)无需外加电感即可振荡<sup>[2]</sup>. 由于 DUBAT 与 PDUBAT 结构相似, 受文献[2]的启发, 我们做了大量的实验, 发现 DUBAT 无需外加电感, 也可产生振荡, 振荡频率随控制端电压变化而变化, 并且线性度较好. 由于 DUBAT 结构简单, 制作容易, 这无疑简化了压控振荡器的设计, 只要选择合适的参数, DUBAT 就是一个新型的压控振荡器. 本文首次给出了实验数据, 分析了无电感 DUBAT 压控振荡器的工作原理, 并给出了其等效电路, 分析了各参数对振荡特性的影响.

### 2 器件结构

我们研制的无电感压控振荡器的主要器件为 DUBAT, 它是在  $N_2Si_31114$  外延材料上, 先后扩散  $P_1$ 、 $P_2$  区和  $N_2^+$  区制成

的. 其制造工艺与常规硅 NPN 管的制造工艺完全相同, 其结构剖面图如图 1 所示. 它由一个 PN 结和一个相距较近的纵向 NPN 管组成, 是具有  $N_1$  和  $P_2$  两个基区的复合晶体管, 所以叫双基区晶体管. 图中,  $P_1$  区和 NPN 管之间的部分我们定义为耦合区 C;  $P_1N_1$  结靠近耦合区一侧的部分定义为  $D_L$ , 其余部分定义为  $D_V$ ; NPN 管靠近耦合区的横向部分定义为  $NPN_L$ , 其余部分定义为  $NPN_V$ ;  $P_1N_1$  结与衬底之间的体电阻定义为  $R_{tp}$ , 耦合区与衬底之间的体电阻定义为  $R_{bc}$ ;  $NPN_V$  的集电极分布电阻定义为  $R_{bv}$ ; 定义整个衬底为 DUBAT 的集电极 (Collector), NPN 管的发射极为 DUBAT 的发射极 (Emitter),  $P_1$  区引出的接触电极为 DUBAT 的基极 (Base).

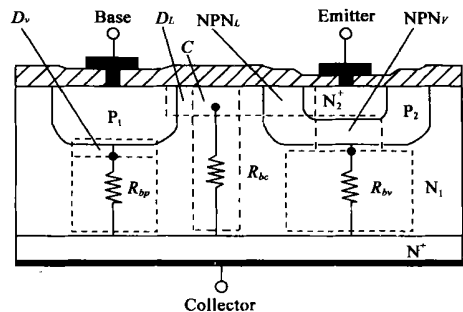


图 1 DUBAT 结构剖面图

### 3 等效电路及工作原理

#### 3.1 等效电路

基于 DUBAT 的无电感压控振荡器的电路连接图如图 2 所示. 图中 Q 为 DUBAT,  $R_{sm}$  为取样电阻, 测试用, 值很小, 此电阻没有在等效电路中给出. 由于  $P_1$  区结电容较小, 电路振荡频率过高, 不便于观测, 因此我们在实验过程中增加了  $R_{ext}$  和  $C_{ext}$ , 这样等效  $P_1N_1$  结电容有很大增加, 降低了电路的工作频率, 以便于观测.

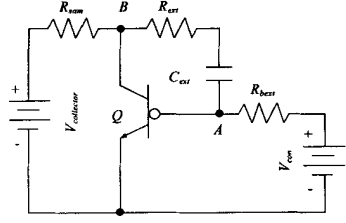


图2 振荡器器件连接图

根据器件结构及器件连接图, 我们给出了此压控振荡器的等效电路, 如图 3 所示. 图中 PNP 管为  $D_L$ 、耦合区 C 以及  $NPN_L$  的基区形成的寄生横向 PNP 管,  $R_{bct}$  为控制电压源与 DUBAT 基极间的限流电阻,  $R_{ext}$  为外加的限流电阻, 它是为了限制 PNP 管瞬间放电造成的大电流脉冲.  $C_{ext}$  为外加电容. 图中各 PN 结结电容没有画出, 其值已在相应元件的模型参数中给出.

#### 3.1.2 工作原理

3.1.2.1 振荡过程 如果 DUBAT 的集电极和基极加上了合适的偏置电压, 基极偏压高于集电极偏压, 此时  $P_1$  区向  $N_1$  区注入空穴, 一小部分空穴通过  $D_L$  注入到耦合区, 并被 NPN 管的收集结收集, 这与文[3]中描述的情况类似, 只不过那里是光注入, 而此处为电注入. 这部分注入电流构成了 NPN 管的基极电流. 在此注入基极电流的作用下,  $NPN_L$  管向耦合区 C 输出电子流, 该电子流的一部分在耦合区与空穴复合或者注入到 PNP 管发射区形成 PNP 管的基极电流, 其余部分电子在衬底至耦合区的电场作用下漂移到衬底形成 DUBAT 集电极电流的一部分, 这股电流在耦合区与衬底间体电阻  $R_{bc}$  上形成电压降, 使 C 区电位下降.  $D_L$  的正偏程度加强, 通过  $D_L$  注入耦合区的空穴增多, 注入 NPN 管的基极电流增加, 于是 NPN 管输出电流增加,  $NPN_L$  输出电流增加,  $R_{bc}$  上压降增加, C 区电位下降,  $D_L$  正偏程度加强, 这是个正反馈的过程(这也可以从等效电路的角度来看), 这种正反馈过程的存在, 使 NPN 管对基极空穴电流的微小扰动很敏感.

如果基极电流有微量增加, 则通过正反馈作用,  $R_{bc}$  上压降增加, 耦合区 C 电压会迅速下降, 直至  $NPN_L$  进入深饱和状态(耦合态). 根据 PN 结的正向特性可以知道, C 区电位迅速下降到一定程度之后, 将会带动整个  $P_1$  区的电位下降, 由于电容两边的电压不能突变, 图 3 中 M 点电压也跟着迅速下降(图中没有画出二极管的  $D_V$  结电容), 在 DUBAT 集电极(Collector)电压(记为  $V_{collector}$ )一定的条件下, 随着  $P_1N_1$  结电容的放电, M 点电压很快上升,  $P_1$  区底部的 PN 结  $D_V$  正偏的程度将逐渐减弱直至反偏. 这说明,  $P_1$  区靠近耦合区一侧的 PN 结和它的其余部分的 PN 结偏置是不一样的, 物理上应该分开, 即  $D_L$ 、 $D_V$ 、M 点电压最终上升到接近于  $V_{collector}$ . 与  $D_V$  和  $R_{tp}$  的情况类似, N 点电位先突然下降, 然后很快上升到接近于  $V_{collector}$ ,  $C_{ext}$  经历了放电和反向充电的过程, 这个过程非常迅速, 在此过程中, PNP 和  $NPN_L$  管仍处于耦合状态, PNP 管发射极仍有较大电流流过. 随着  $C_{ext}$  接近先放电再反向充电过程的结束, 经  $D_L$  注入耦合区 C 的电流(即 PNP 管的发射极电流), 不足以维持 PNP 管与  $NPN_L$  的耦合状态, PNP 管的发射极电流开始减小,  $NPN_L$  集电极电流随之减小, 流过  $R_{bc}$  的电流减小, 耦合区电压开始升高, 耦合区电位的升高又导致  $D_L$  正向偏压减小, 即 PNP 管的发射结偏压减小, PNP 管的发射极电流进一步减小, 这同样是个正反馈过程,  $D_L$  (即 PNP 管发射结)迅速由正偏变为反偏, 耦合区电压接近  $V_{collector}$ , 此时  $D_V$ 、 $D_L$  均反偏并关闭, 外控制电源通过基极限流电阻  $R_{bct}$  给  $C_{ext}$  和  $P_1N_1$  结电容充电, 直至基极(Base)电压上升到足够高, 使  $D_L$  重新开启, 耦合区 C 电位迅速下降,  $C_{ext}$  及  $P_1N_1$  结电容通过  $D_L$  放电, 这样就开始重复上面所描述的过程, 形成振荡. 振荡过程中, 相关位置的电压电流的模拟波形如图 4、图 5 所示.

3.1.2.2 维持振荡的控制电压边界条件 在  $V_{collector}$  一定的条件下, 外部控制电压  $V_{cn}$  必须在某个范围内才能维持振荡, 定义维持振荡的控制电压的下界为  $V_{cmin}$ , 上界为  $V_{cmax}$ . 定义  $NPN_L$  输出电子电流中用于与空穴复合和流入  $P_1$  区的电子电流(即形成 PNP 管基极电流的部分)占流向耦合区电子电流的比率为  $K$ ,  $NPN_L$  管的有效电流放大倍数为  $B_{NPN_L}(t)$ , PNP 管的有效电流放大倍数为  $B_{PNP}(t)$ , 正反馈倍增因子:

$$K = K \# B_{NPN_L}(t) \# B_{PNP}(t) \tag{1}$$

假设  $NPN_L$  管注入耦合区 C 电流有增量  $\delta i$ , 经过正反馈机制

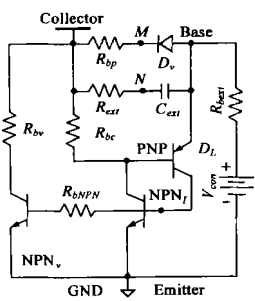


图3 振荡器等效电路图

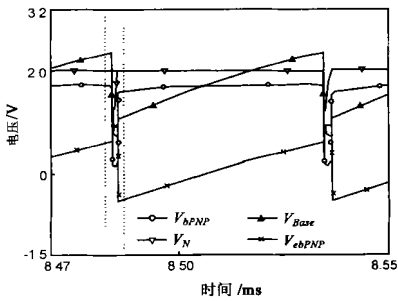


图4 振荡过程中, 相关位置的电压电流模拟波形

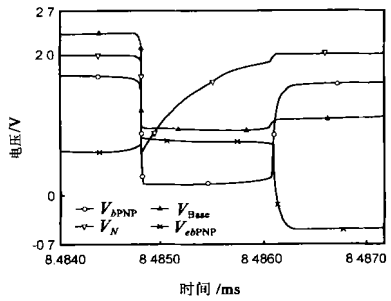


图5 振荡过程中, 相关位置的电压电流模拟波形的局部放大图

后, 一次增生增量为  $K\Delta i$ , 二次增生增量为  $K^2\Delta i$ , ..., 所以总增量为  $(\Delta i + K\Delta i + K^2\Delta i + \dots)$ . 显然, 如果  $K < 1$ , 那么 NPN 管基流的微小扰动的总效果是收敛的; 而当  $K \geq 1$  后, 微小扰动引起的总效果则是发散的, 系统将会发生振荡.

$V_{con}$  不能过低, 假设由于正反馈使耦合区电位处于最高值 (记为  $V_{conmax}$ ) 时,  $V_{con}$  与  $V_{conmax}$  之差不足以使  $D_L$  开启, 系统不会发生振荡 (这种情况是 PNP 截止或弱开启而使  $B_{PNP}(t)$  过小, 从而  $K < 1$ ), 所以  $V_{con}$  至少比  $V_{conmax}$  高出一个 PN 结的导通压降 (记为  $V_{DLon}$ ) 才能发生振荡 (临界情形  $K = 1$ ),  $V_{conmin} = V_{conmax} + V_{DLon}$ ;  $V_{con}$  也不能过高, 在  $V_{con}$  达到上界时, 很快能使 NPN<sub>L</sub> 进入深饱和, 进入饱和状态后, 由于  $V_{con}$  足够大, 它通过  $R_{bext}$  注入系统的电流能够维持  $R_{bext}$ , PNP, NPN<sub>L</sub> 的耦合状态, 所以电路被锁死, 系统同样不会发生振荡 (这种情况是 NPN<sub>L</sub> 极深饱和而使  $B_{NPN_L}(t)$  过小, 从而  $K < 1$ ), 定义电路被锁死时的临界控制电压为  $V_{LOCK}$ , 则  $V_{conmax} = V_{LOCK}$ ,  $V_{LOCK}$  与  $V_{collector}$  及  $R_{bext}$  等因素有关.

#### 4 振荡频率 $f$ 与控制电压 $V_{con}$ 的函数关系

图 3 中  $R_{ext}$ ,  $R_{bc}$  较小, 结合 3.1.2.1 的分析, 电路振荡起来后, M, N 点的电位从突降到升高到接近于  $V_{ceNPN_L}$  (对应于  $P_1N_1$  结电容放电以及  $C_{ext}$  的放电和反向充电的过程) 的时间很短, 对应于 PNP 管的导通过程. 当 PNP 管的发射极几乎无电流通过时,  $P_1N_1$  结电容放电和  $C_{ext}$  的反向充电均已完成, 记此时 NPN<sub>L</sub> 的集电极和发射极间压降为  $V_{ceNPN_L}$ ,  $P_1$  区电位近似为  $(V_{ceNPN_L} + V_{DLon})$ , 如果考虑 DUBAT 基极接触电极至  $D_L$  的串联电阻 (等效电路图中没有给出), 则  $P_1$  区电位还应加上此串联电阻上的压降.  $P_1$  区电位还可能受到其它因素的影响, 综合多种因素的影响后的  $P_1$  区电位记为  $V_{P1min}$ , 外部电容和  $P_1N_1$  结电容的总电容 (记为  $C_T$ ) 靠  $P_1$  区一极便从  $V_{P1min}$  开始, 随着控制电压对其充电, 电位逐渐升高. 充电过程直至  $P_1$  区电位近似为  $V_{conmin}$  时结束 (记此时  $P_1$  区电位为  $V_{P1max}$ ),  $C_T$  的另一个电极 (其电位记为  $V_{cons}$ ) 近似保持  $V_{ceNPN_L}$  不变. 一个振荡周期中 PNP 管的导通过程相对于  $C_T$  的充电过程而言可以忽略不计, DUBAT 集电极和发射极电压一定时  $V_{P1min}$  和  $V_{P1max}$  为常数. 记充电过程中  $P_1$  区电位为  $V_{P1}(t)$ ,  $t_0$  为一个振荡周期中  $C_T$  开始充电的时刻,  $t_1$  为一个振荡周期中  $C_T$  充电过程的结束时刻,  $T$  为振荡器的振荡周期,  $f$  为振荡器的振荡频率, 于是我们得到:

$$V_{P1}(t_0) = V_{P1min} \quad (\text{边界条件一})$$

$$V_{P1}(t_1) = V_{P1max} \quad (\text{边界条件二})$$

$$\Delta t = t_1 - t_0 = UT = \frac{1}{f} \quad (2)$$

$$C_T \frac{d(V_{P1}(t) - V_{cons})}{dt} = \frac{V_{con} - V_{P1}(t)}{R_{bext}} \quad (3)$$

带入边界条件化简得到

$$(1 - e^{-T/(R_{bext} \cdot C_T)}) = \frac{V_{P1max} - V_{P1min}}{V_{con} - V_{P1min}} \quad (4)$$

将  $e^{-T/(R_{bext} \cdot C_T)}$  幂级数展开, 并取一级近似得到

$$\frac{T}{R_{bext} \cdot C_T} U \frac{V_{P1max} - V_{P1min}}{V_{con} - V_{P1min}} \quad (5)$$

进一步有

$$f U \frac{V_{con}}{R_{bext} \cdot C_T \cdot (V_{P1max} - V_{P1min})} = \frac{V_{P1min}}{R_{bext} \cdot C_T \cdot (V_{P1max} - V_{P1min})} \quad (6)$$

可以看出, 振荡频率  $f$  与控制电压具有近似的线性关系.

#### 5 实验结果与模拟结果

我们对电路进行了实验和模拟, 图 6(a) 上面一条曲线为实验得到的 DUBAT 的基极电压的脉冲波形 (图 2 中 A 点电压波形), 下面一条曲线为 DUBAT 的集电极和发射极之间的电压波形 (图 2 中 B 点电压波形); 图 6(b) 为 SPICE 模拟的 DUBAT 基极电压波形以及 DUBAT 输出电流波形. 从这两幅图来看, 在曲线形状上实验结果与模拟结果极其相似. 需要说明的是, 我们进行的所有模拟, 只是用 SPICE 对原理性电路进行模拟, 用于说明该振荡器的工作机理, 电路中的各参数与实际的参数目前还没有完全的对应关系, SPICE 的模拟结果与实际的实验结果是质上的对应关系, 而不完全有量上的对应关系.

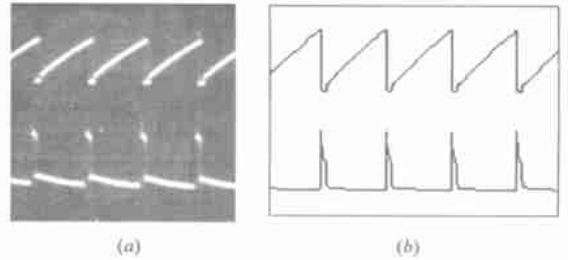


图 6 DUBAT 基极、集电极电压实验波形以及基极电压、集电极输出电流模拟波形

实验过程中, 我们选择  $R_{ext} = 458$ ,  $C_{ext} = 20E + 4pF$ . 固定  $R_{bext} = 618k$ , 实验得到了  $V_{collector}$  分别为 21.0V, 31.5V, 51.0V 的三组数据, 并将相同条件下的 SPICE 模拟的数据一起作在了图 7 中, 图中  $V_c$  指 DUBAT 集电极电压  $V_{collector}$ . 从图中可以看出, 在控制电压  $V_{con}$  一定的条件下, 随着  $V_{collector}$  的增加, 振荡频率减小, 并且曲线的斜率也减小. 结果可以从式 (6) 很容易地来解释: 随着  $V_{ce}$  的增加,  $(V_{P1max} - V_{P1min})$  增加,  $V_{P1min}$  基本不变, 近似为  $(V_{ceNPN_L} + V_{DLon})$  (详见第 4 节的分析), 于是在  $V_{con}$  一定时, 由式 (6) 可以看出, 随着  $V_{collector}$  的增加,  $f$  减小, 并且曲线的斜率减小. 从图可知, 对于这种关系, 模拟结果 (虚线) 与实

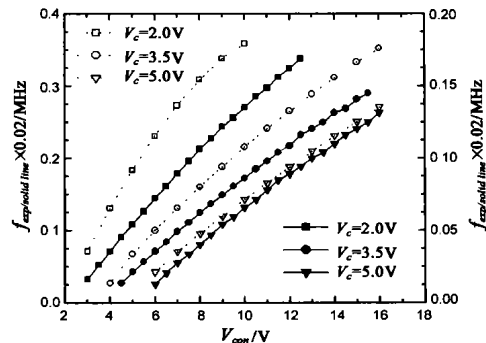


图 7  $V_{collector}$  分别为 21.0V, 31.5V, 51.0V 时的实验曲线 (实线) 和模拟曲线 (虚线)

验结果(实线)是一致的.再固定  $V_{\text{collector}}$  为 210V, 实验得到了  $R_{\text{bext}}$  分别为 218k $\Omega$ , 418k $\Omega$ , 618k $\Omega$  的三组数据, 并将相同条件下的 SPICE 模拟的数据一起作在了图 8 中. 可以看出, 在控制电压  $V_{\text{cm}}$  一定时, 随着  $R_{\text{bext}}$  的增加, 振荡频率减小, 并且曲线的斜率也减小, 式(6)解释了这一点.

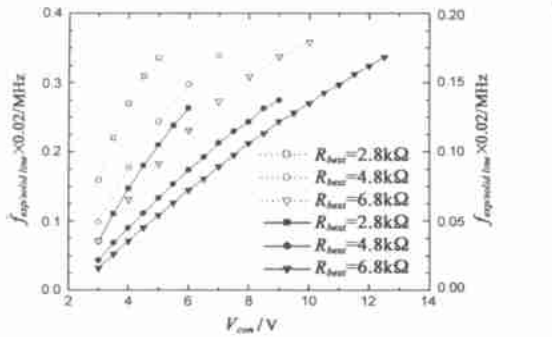


图 8  $R_{\text{bext}}$  分别为 218k $\Omega$ , 418k $\Omega$ , 618k $\Omega$  时的实验曲线(实线)和模拟曲线(虚线)

从图 7、图 8 可以看出, 当频率较高时, 曲线偏离线性. 这主要因为频率较高之后, PNP 管的导通时间在整个振荡周期中的比率开始升高, 已不能忽略, 并且此导通时间随着  $V_{\text{cm}}$  的增大而增大. 另外, 从两幅图中还可以看出电路的振荡频率较低, 其原因是为便于观测, 外部增加了电容  $C_{\text{ext}}$ . 在电路设计及使用过程中, 可以通过控制  $P_1$  区面积来控制  $P_1N_1$  结电容, 或改变  $C_{\text{ext}}$ , 来改变等效总电容  $C_T$ , 配合调整外部串联电阻  $R_{\text{bext}}$ , 达到所要求的工作频率. 从式(6)可以看出,  $C_T$ 、 $R_{\text{bext}}$  越小工作频率越高. 由于实际的  $P_1N_1$  结电容较小(约 100pf), 而外接电容  $C_{\text{ext}}$  (20E+ 4pf) 要大得多, 因此从理论上分析, 适当减小  $C_{\text{ext}}$  和  $R_{\text{bext}}$ , 新型压控振荡器的振荡频率可达到数十兆赫.

## 6 结论

本文首次提出并研制了一种基于 DUBAT 的新型压控振荡器, 实验得到了频率/电压数据, 分析了它的工作原理, 给出了等效电路, 得出了振荡频率与控制电压的关系函数, 进行了

SPICE 模拟, 模拟结果与实验结果是一致的.

实验及模拟的结果均表明, 该压控振荡器具有良好的线性, 在特定的外部偏置条件下, 它既可以作为普通的振荡源, 也可以作为压控振荡器, 特别是, 它无需电感, 结构简单, 工艺与双极集成电路工艺相容, 在系统集成(SOC)领域将具有广阔的应用前景.

## 参考文献:

- [1] 郭维廉, 郑云光, 侯曾, 等. 功率双基区晶体管(DUBAT)及其压(流)控调频效应[J]. 固体电子学研究与进展, 1994, 14(4): 310- 316.
- [2] 沙亚南, 李树荣, 郭维廉, 等. PDUBAT 光控脉冲振荡器的实验研究[J]. 微电子学, 2000, 30(1): 11- 13.
- [3] 何民才, 陈丙若, 黄启俊, 等. 间接耦合光电探测器[J]. 中国科学(A 辑), 1990, (4): 431- 439.

## 作者简介:



吴 静 男, 1978 年 2 月出生于江苏扬州, 2001 年毕业于天津大学电信学院微电子技术专业, 获工学学士学位, 现为天津大学 ASIC 设计中心硕士研究生, 主要研究方向半导体新型器件、VLSI 设计及其应用等.



李树荣 男, 1946 年 3 月出生于河北盐山, 教授, 1970 年毕业于天津大学电子工程系, 此后一直在天津大学电信学院从事微电子技术方面的教学和科研工作, 近期研究方向包括 SOI/SiGe/ BiCMOS 集成电路研究; 光电负载器件及光电子集成等, 先后发表论文 20 余篇.