

一种改进了碰撞电离的超高速 InP 基 SHBT SDD 模型*

葛 霁 金 智[†] 刘新宇 程 伟 王显泰 陈高鹏 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 从物理机制上分析了超高速 InP/InGaAs SHBT 碰撞电离与温度的关系, 通过加入表示温度的参数和简化电场计算, 得到一种改进的碰撞电离模型. 同时针对自有工艺和器件特性, 采用 SDD(symbolically defined device) 技术建立了一个包括碰撞电离和自热效应的 InP/InGaAs SHBT 的直流模型. 模型内嵌入 HP-ADS 中仿真并与测试结果进行比较, 准确地拟合了 InP/InGaAs SHBT 的器件特性.

关键词: 碰撞电离; 温度依赖; 超高速 InP 基 SHBT; SDD 模型

PACC: 8160C; 9240C; 6185

中图分类号: TN402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)09-1799-05

进行仿真, 仿真结果与测试结果拟和完好.

1 引言

准确的器件模型在现代高速、高性能的毫米波集成电路设计中是必不可少的. InP 基 SHBT 功耗低, 速度快, 在超高速数模混合电路中有着广泛的应用^[1,2]. 传统的通用模型 VBIC^[3] 基于 Si 工艺开发, 并不适用于 InP 基 SHBT. 因此, 迫切需要一种针对 InP 基 SHBT 的器件模型.

InP 基 SHBT 截止频率较高, 集电极采用 InGaAs 窄禁带材料, 击穿电压较低, 碰撞电离效应十分明显. 同时 InGaAs 材料导热性较差, 自热效应引起结温显著上升, 理论和实验都表明^[4,5], InGaAs 的 α_n (电子电离系数) 随温度上升而加大, 而碰撞电离的加大又进一步增大了器件的功耗, 从而使功率耗散引起的结温上升与碰撞电离成正反馈关系. 因此, 碰撞电离效应极为显著, 严重影响 InP 基 SHBT 的性能. 准确地分析和模拟碰撞电离的过程, 对于建立电路模型有着重要的作用. 许多研究者都对其展开了研究, Wang 等人^[6] 直接应用经典公式对倍增因子进行计算, 但过于复杂, 不适于模型的建立. Weiß^[7] 给出了一种简化模型, 便于实现, 但未考虑到由于自热效应引起的温度升高对碰撞电离的影响, 拟和结果并不十分理想; Kim 等人^[8] 直接采用数值拟和的方法, 并未考虑物理意义, 结果不够精确. 而且, 以上研究者都只给出了倍增因子的计算方法, 而不能直接嵌入通用电路设计软件如 HP-ADS 中进行模型仿真, 从而设计电路.

作者从物理机制出发, 提出了一种更为准确和简洁的碰撞电离模型. 针对我们设计并流片实现的 InP/InGaAs SHBT^[9], 建立了一个包括自热效应与碰撞电离效应的直流 SDD 模型. 其中, 利用自热模型计算器件温度, 并加入到碰撞电离模型中. 最后, 模型内嵌 ADS 中

2 模型与实现

器件是由中国科学院微电子研究所微波集成电路研究室工艺线设计、流片实现的 InP/InGaAs SHBT, f_t 达到 210GHz^[9], 材料结构见表 1. 发射极面积为 $1.8\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, 采用了 Polyimide 钝化平坦化工艺.

SDD 是 Agilent ADS 为用户自行建立模型而开发的基于公式实现的模块, 可以自由定义关系方程. 一方面它避免了复杂的用于描述模型的程序语言, 另一方面也可以轻易地实现各种模型, 直接内嵌入通用的仿真软件 HP-ADS 中进行模拟分析.

2.1 直流模型

图 1 为直流模型拓扑图. 借鉴传统的 VBIC 直流模型^[3], 针对 InP 基 SHBT 的物理结构和工艺特性, 做出如下修正: (1) 考虑到异质结的能带尖峰效应, 将集电极电流区分为正向电流源 I_{FT} , 反向电流源 I_{RT} ^[10]. (2) B-E 结电流为复合电流, 按理想因子的不同分别用 I_{BE1} , I_{BE2} 两个电流源表示. 与 VBIC 模型不同, 由于实际落在 R_{BI} 上的电压很小, 此处略去外 B-E 结电流. (3) 在 VBIC 模型基础上, 将 B-C 结电流分为内部和外部, 每部分又按理想因子分为 I_{BC1} , I_{BC2} 和 I_{BCX1} , I_{BCX2} 4 种电流源表示. (4) B-C 结加入电流源 I_{CM} 表示倍增电

表 1 材料结构

Table 1 Material structure

Layer	Doping/cm ⁻³	Material	Thickness/nm
Emitter	$n = 3 \times 10^{17}$	InP	60
Base	$p = 3 \times 10^{19}$	In _{0.53} Ga _{0.47} As	40
Collector	$n = 10^{16}$	In _{0.53} Ga _{0.47} As	250
Subcollector	$n = 3 \times 10^{19}$	InP	300

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号:2002CB311902)

[†] 通信作者. Email: jinzhi@ime.ac.cn

2008-03-27 收到, 2008-04-21 定稿

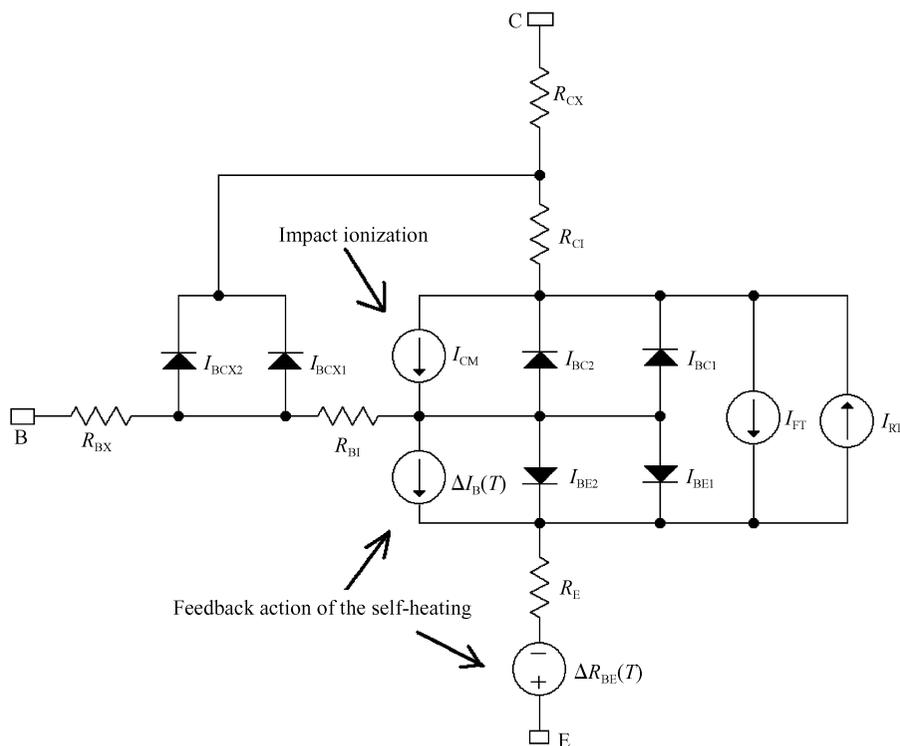


图 1 包括碰撞电离和自热效应的 InP/InGaAs SHBT 直流模型拓扑图

Fig. 1 DC model topology of the InP/InGaAs SHBT including self-heating and impact ionization effects

流. 传统 VBIC 中的弱雪崩模型^[3]对温度的影响考虑不够准确, 此处给出了改进的碰撞电离模型, 具体见 2.2 节. (5) 自热效应的加入. 传统 VBIC 模型用大量的参数来表示温度的影响, 使得参数提取很复杂^[3]. 此处建立 SDD 模型直接计算器件的温度, 并用反馈的方法引入受控电压源 $\Delta V_{BE}(T)$, 受控电流源 $\Delta I_B(T)$ 来表示温度变化对器件特性的影响. 其中 $\Delta V_{BE} = \Phi \Delta T$, $\Delta I_B = K \Delta T$, 其中 ΔT 由图 3 自热效应的 SDD 模型计算所得, Φ, K 为反馈系数.

2.2 碰撞电离模型

工作中的晶体管, 集电极反向偏置, 从发射极注入的电子, 经基区在集电区电场的作用下被扫入集电区. 如果电子在电场的加速下, 获得足够大的能量, 那么在与晶格原子碰撞时, 会把原子中原来处于价带的电子激发到导带, 从而产生新的电子-空穴对, 这就是碰撞电离过程. 这些新的载流子在电场的作用下继续重复上一过程, 使电流大幅度增加, 增加的电流就是倍增电流. 倍增电流与发生倍增前电流的比值, 定义为倍增因子^[11].

2.2.1 倍增因子与温度关系机理分析

倍增因子由以下 4 个量决定: 集电区电场强度、载流子平均自由程、材料的禁带宽度和导带的有效态密度^[12]. 下面具体分析温度和它们的关系:

(1) 与集电区电场强度的关系: 集电区掺杂较低(在 10^{16} cm^{-3} 量级), 可认为电场强度是均匀的^[13], 由外加电势和集电区厚度决定, 与温度无关.

(2) 与载流子平均自由程的关系: 温度上升, 声子散

射加大使得载流子的平均自由程减小, 从而减小了载流子被电场加速的距离, 碰撞电子获得的能量变小, 被激发的自由电子减少, 倍增因子变小^[12].

(3) 与禁带宽度的关系: 温度上升, InGaAs 材料的禁带宽度变窄, 电子更容易被激发成自由电子, 倍增因子变大^[12].

(4) 与有效态密度的关系: InGaAs 导带底部有 Γ 能谷和 L 能谷, 由于 $E_{\Gamma-L}$ 较大^[12], 被激发的电子大都集中在 Γ 能谷而达不到 L 能谷. Γ 能谷的有效态密度较小, 制约了电子的激发. 随着温度上升, Γ 能谷的有效态密度增加. 同时, $E_{\Gamma-L}$ 变小, 更多电子被激发到 L 能谷, 使得导带有效态密度大大增大, 更多电子成为自由电子, 从而倍增因子变大^[12].

禁带宽度、有效态密度两个量随温度成指数变化, 相比之下, 温度对载流子平均自由程影响较小^[5]. 所以, 随着器件发生自热效应, 温度上升, 碰撞电离加大, 导致器件的功耗加大, 温度进一步上升, 自热效应与碰撞电离成正反馈关系.

2.2.2 改进的倍增因子模型

计算倍增因子的经典公式如(1)式所示^[11]:

$$M-1 = \frac{1}{1 - \int_0^W \alpha(E, x) \exp\left\{-\int_0^x [\alpha(E, \xi) - \beta(E, \xi)] d\xi\right\} dx} - 1 \quad (1)$$

其中 $M-1$ 为倍增因子; $\alpha(E, \xi), \beta(E, \xi)$ 分别为电子、空穴的电离系数; W 为集电区的厚度; E 为电场强度.

直接应用经典公式建模面临以下 3 点困难: (1) 电离系数与位置有关^[13]; (2) 电离系数与温度的关系未给

出；(3)需要计算积分.以上 3 点使得计算复杂,难于建立模型,进行电路仿真.同时,没有考虑温度的影响,建立的模型不够准确.为了解决上述 3 个困难,建立简洁准确的模型,做出如下假设:(1)集电区掺杂通常较低(在 10^{16} cm^{-3} 量级),低掺杂下,碰撞电子得到足够能量(激发自由电子所需能量)的加速距离远小于载流子的平均自由程,而不必考虑是否与位置有关,从而电离系数与位置无关.同时,可认为电场强度 E 为常数.实测结果表明,以上的假设符合实际^[13].(2)由 2.2.1 节的分析,温度是必须考虑的因素,所以要加入相关的参数,明确考虑温度的影响.(3)外加电压 $V_{CE} < 2V$,电场强度 $E < 80 \text{ kV/cm}$,即器件工作在低场(E 不超过 100 kV/cm)^[14].可将经典公式做如下近似:

① 在低场下, $\alpha(E, \xi)$ 近似等于 $\beta(E, \xi)$ ^[14].代入(1)式,化为

$$M - 1 = \frac{1}{1 - \int_0^W \alpha(E, T) dx} - 1 \quad (2)$$

② (2)式积分得到

$$M - 1 = \frac{1}{1 - W\alpha(E, T)} - 1 \quad (3)$$

③ 只考虑弱场下的电子电离系数 $\alpha_{\text{InGaAs_LF}}(E)$,其不仅与电场有关,还与温度有关^[5].

$$\alpha_{\text{InGaAs_LF}}(E, T) = A_{\text{LF}}(T) \exp\left(-\frac{B_{\text{LF}}(T)}{E}\right) \quad (4)$$

由 2.2.1 节知,禁带宽度、有效态密度随温度成指数变化,且随温度增大而增大,可得经验公式^[6]:

$$B_{\text{LF}}(T) = C - DT \quad (5)$$

由 2.2.1 节,载流子平均自由程随温度增大而减小,通过拟和实验数据,可得经验公式^[6]:

$$A_{\text{LF}}(T) = A - BT \quad (6)$$

其中 A, B, C, D 作为拟和参数.将 $E = V_{\text{CB}}/W$ 与(5),(6)式代入(4)式,可得

$$\alpha_{\text{InGaAs_LF}}(E, T) = (A - BT) \exp\left[-\frac{W(C - DT)}{V_{\text{CB}}}\right] \quad (7)$$

④ 将得到的电子电离系数(7)式代入(3)式,得到下面倍增因子公式:

$$M - 1 = \frac{1}{1 - W(A - BT) \exp\left[-\frac{W(C - DT)}{V_{\text{CB}}}\right]} - 1 \quad (8)$$

2.2.3 碰撞电离模型的 SDD 实现

图 2 为碰撞电离的 SDD 模型, $M - 1$ 为(8)式计算所得.根据倍增电流定义^[11],可求得倍增电流: $I_{\text{cm}} = I_c - I_{\text{cn}} = (M - 1)I_{\text{cn}}$,其中, I_{cn} 为发生倍增前的电流, I_{cm} 为倍增电流, I_c 为发生倍增后的电流.涉及的参数中,器件温度 T 不能直接得到,同时又对碰撞电离影响很大,需要仔细计算器件由于自热效应引起的温度变化.自热效应引起的结温增加与功率耗散有关,可写成如下公式^[11]:

$$\Delta T = R_{\text{th}}(V_{\text{ce}} I_c) + R'_{\text{th}}(V_{\text{ce}} I_c)^2 \quad (9)$$

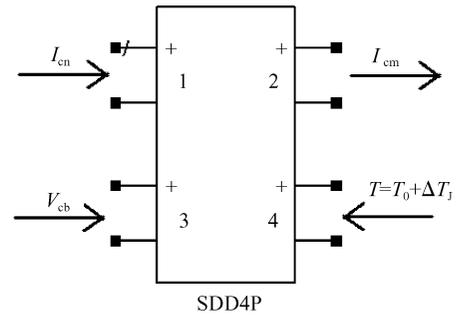


图 2 碰撞电离的 SDD 模型

Fig.2 SDD model of impact ionization

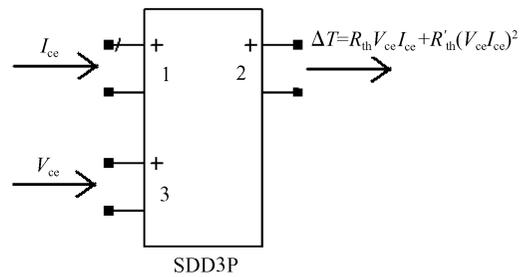


图 3 自热效应的 SDD 模型

Fig.3 SDD model of self-heating

其中 $R_{\text{th}}, R'_{\text{th}}$ 为器件的热阻; ΔT 为升高的温度,那么可得器件温度 $T = T_0 + \Delta T$,其中 T_0 为环境温度.图 3 用 SDD 为自热效应建模,计算自热产生的温度变化 ΔT .

3 模型验证与讨论

表 2 为 InP/InGaAs SHBT SDD 模型参数. I_s 和 NF 分别为正偏饱和电流和理想因子, I_{SR} 和 NR 为反偏饱和电流和理想因子. $I_{\text{BE1}}, I_{\text{BE2}}, NE1, NE2$ 为 B-E 结饱和电流和理想因子, $I_{\text{BC1}}, I_{\text{BC2}}, NC1, NC2$ 为内 B-C 结饱和电流和理想因子, $I_{\text{BCX1}}, I_{\text{BCX2}}, NCX1, NCX2$ 为外 B-C 结饱和电流和理想因子. $R_E, R_{\text{B1}}, R_{\text{Bx}}, R_{\text{C1}}, R_{\text{Cx}}$ 分别为发射区电阻、基区内外电阻和集电区内外电阻. A, B, C, D 为碰撞电离拟合因子,根据测试结果拟合得到. R_{TH} 为热阻, Φ, K 分别为受控电压源 $\Delta V_{\text{BE}}(T)$,受控电流源 $\Delta I_{\text{B}}(T)$ 的反馈系数.

要想得到倍增因子,先要测试以下两个量: $I_c(V_{\text{CB}})$ 为发生倍增后的集电极电流, $I_c(V_{\text{CB}} = 0)$ 为将发生倍增时的集电极电流, $I_c(V_{\text{CB}}) - I_c(V_{\text{CB}} = 0)$ 即为倍增电流.根据倍增因子定义,可得倍增因子 $M - 1$ ^[4].

$$M - 1 = \frac{I_c(V_{\text{CB}}) - I_c(V_{\text{CB}} = 0)}{I_c(V_{\text{CB}} = 0)} \quad (10)$$

图 4 为 $V_{\text{BE}} = 0.7 \sim 0.79 \text{ V}$ 时,倍增因子 ($M - 1$) 随 V_{CB} 变化的测试和 SDD 模型模拟结果.有以下 3 个特点:(1) $M - 1$ 随 V_{CB} 增大而不断增大,导致曲线上翘.原因是 V_{CB} 增大,导致集电区电场增大,电场变大会使碰撞电子得到更大的能量,激发出更多的自由电子,所以 $M - 1$ 不断增大.(2) 随着 V_{BE} 的增大, $M - 1$ 也在不断增大.这是因为随着 V_{BE} 增大,集电极电流在增大,从而器

表 2 InP/InGaAs SHBT SDD 模型参数
Table 2 Extracted parameters of the InP/InGaAs SHBT SDD model

参数	值	参数	值	参数	值	参数	值
I_S	$2.91 \times 10^{-14} \text{ A}$	NF	1.20	I_{SR}	$1.24 \times 10^{-14} \text{ A}$	NR	0.90
I_{BE1}	$1.56 \times 10^{-15} \text{ A}$	NE1	1.30	I_{BE2}	$1.55 \times 10^{-11} \text{ A}$	NE2	2.51
I_{BC1}	$8.02 \times 10^{-13} \text{ A}$	NC1	1.35	I_{BC2}	$8.03 \times 10^{-13} \text{ A}$	NC2	1.19
I_{BCX1}	$1.20 \times 10^{-12} \text{ A}$	NCX1	1.12	I_{BCX2}	$8.02 \times 10^{-12} \text{ A}$	NCX2	1.30
R_E	2.41Ω	R_{BI}	6.11Ω	R_{BX}	5.77Ω	R_{CI}	10.7Ω
R_{CX}	2.80Ω						
A	7.85×10^3	B	1.57×10^2	C	1.30×10^4	D	23.0
R_{TH}	$1.54 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	K	1.95×10^{-7}	Φ	9.42×10^{-3}		

件功耗加大,发生的自热效应导致器件温度升高,由 2.2.1 节的分析,温度升高使得 $M - 1$ 增大。(3) 随着 V_{BE} 的增大, $M - 1$ 随 V_{CB} 增大的速度加快,曲线的斜率不断增大.这是由于 V_{BE} 增大,导致器件工作电流增大,从而功耗增大.功耗增大使结温上升,导致倍增因子 $M - 1$ 增大,从而倍增电流增大,结温上升与 $M - 1$ 增大为正反馈关系.模型模拟的结果(实线)完全符合实际器件中倍增因子的变化.简化电场计算,加入温度参数的改进模型,准确地模拟了碰撞电离效应.

图 5 为正向 Gummel plot 的测试和模型仿真比较图. I_B 曲线分为两部分:低电流区与高电流区.由于电流的复合机理不同,导致理想因子不同,分别用不同电流源来拟合. I_C 曲线在大电流区略微下降,主要原因是

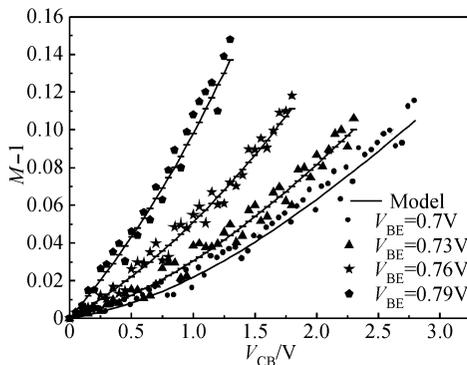


图 4 在不同 V_{BE} 下,碰撞电离倍增因子($M - 1$)随 V_{CB} 变化关系
Fig.4 Multiplication factor ($M - 1$) as a function of V_{CB} at different V_{BE}

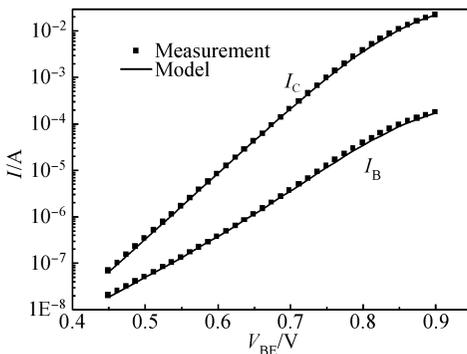


图 5 Gummel plot 的测试和模拟
Fig.5 Measured and modeled forward Gummel-plots

一部分电压落在电阻上,使实际落在结上的电压变小.模型对以上现象作了充分的考虑,仿真结果与实测曲线拟和完好.图 6 为输入 I_B ($0 \sim 100 \mu\text{A}$),输出特性测试与仿真的比较图,明显地表现出自热效应和碰撞电离的影响.(1) I_B 较小时,并未出现明显的自热效应,随着 V_{CB} 增大,碰撞电离效应显著,电流微微增大.(2) I_B 较大时,电流在增大之前,出现了一小段下降,且随着 I_B 的增大,下降越来越明显.这是因为此时器件功耗已经较大,同时 InGaAs 的热阻又较高^[15],自热效应比较明显,出现了电流塌陷现象.而当 V_{ce} 进一步变大时(大于 1V), V_{cb} 变为正值,并不断增大,碰撞电离效应开始显现,并成为主导效应,抵消了由于自热效应产生的电流塌陷,电流又开始增大,曲线上翘.(3) 随着 I_B 的增大,电流增大越来越快,反映了结温上升与 $M - 1$ 增大互为正反馈的现象.以上测试中出现的电流先减小后增大的现象,传统模型不能准确地进行模拟.作者从物理机制出发,分析了碰撞电离与温度的关系,认为开始电压较小时,是由于自热效应导致了电流的减小.后来电压不断加大,碰撞电离起主导作用,并与温度成正反馈关系,导致了电流的增大.改进的模型准确地模拟了这个现象.

图 7 为输入 V_B ($720 \sim 855 \text{ mV}$) 时,输出特性测试与仿真的比较图.当 V_B 较小时, $M - 1$ 较小(见图 4),碰撞电离效应不明显,当 V_B 较大时,由于 I_C 变大,器件功耗增大,结温上升, $M - 1$ 急剧增大,碰撞电离已经比较明显,曲线上翘.模型较好地拟合了这个现象.

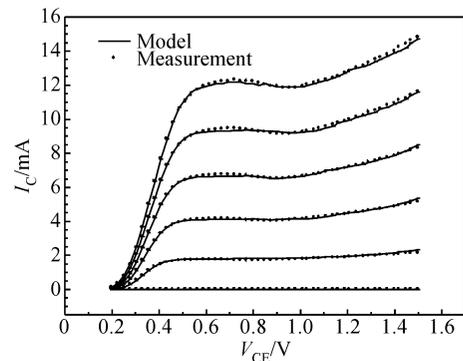


图 6 InP/InGaAs SHBT 的输出特性测试与模型模拟 输入 $I_B: 0 \sim 100 \mu\text{A}$, 步进 $20 \mu\text{A}$
Fig.6 Measured and modeled I_C versus V_{CE} characteristics under a constant I_B $I_B: 20 \mu\text{A}/\text{step}$ ($0 \sim 100 \mu\text{A}$)

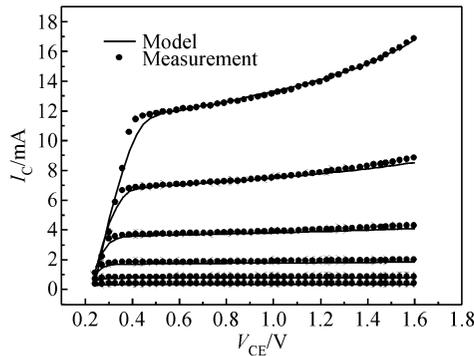


图7 InP/InGaAs SHBT 的输出特性测试与模型模拟 输入 V_B :720~855mV, 步进 27mV

Fig.7 Measured and modeled I_C versus V_{CE} characteristics under a constant V_B V_B :0.027V/step (720~855mV)

4 结论

从物理机制出发,分析了 InP/InGaAs SHBT 碰撞电离与温度的关系,加入了表示温度的参数,同时简化了电场的计算,提出了一种更为准确和简洁的碰撞电离模型. 针对我们独立设计并流片实现的 InP/InGaAs SHBT,建立了一个包括碰撞电离效应和自热效应的 SDD 直流模型. 其中,利用自热效应模型计算器件温度,并加入到碰撞电离模型中. 模型内嵌入 HP-ADS 中进行仿真,并将仿真结果与测试结果进行比较,其准确地拟合了 InP/InGaAs SHBT 的器件特性.

参考文献

[1] Fukuyama H, Sano K, Ida M. InP/InGaAs DHBT parallel feedback amplifier with 14-dB gain and 91-GHz bandwidth. Proc Int Conf Indium Phosphide Related Materials, Kagoshima, Japan, 2004:659

[2] Caruth D, Shen S C, Chan D. A 40Gb/s integrated differential PIN + TIA with DC offset control using InP SHBT technology. 2002 GaAs IC 24th Annual Technical Digest, 2002:59

[3] McAndrew C C, Seitchik J A, Bowers D F. VBIC95: an improved vertical, IC bipolar transistor model. Proceedings of the Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 1995:170

[4] Ritter D, Hamm R A, Feyngenson A. Anomalous electric field and temperature dependence of collector multiplication in InP/GaInAs heterojunction bipolar transistors. Appl Phys Lett, 1995, 60(25):3150

[5] Neviani A, Meneghesso G, Zanoni E. Positive temperature dependence of electron impact ionization coefficient in InGaAs/InP HBTs. IEEE Electron Device Lett, 2000, 18:619

[6] Wang Hong, Yang Hong, Neo W P. Temperature dependence of avalanche multiplication in InP based HBTs with InGaAs/InP composite collector: device characterization and physics model. IEEE Trans Electron Devices, 2003, 50(12):2335

[7] Weiß O, Baureis P, Kellmann N. A new compact model for the avalanche effect in InAlAs/InGaAs HBTs. IEEE Electron Device Lett, 2006, 27:431

[8] Kim T, Yang K. A new large-signal InP/InGaAs single HBT model including self-heating and impact ionization effects. IEEE MTT-S Digest, 2002:2141

[9] Cheng Wei, Jin Zhi, Liu Xinyu. Ultra high-speed InP-InGaAs SHBTs with f_t of 210GHz. Journal of Semiconductors, 2008, 29(3):414 (in Chinese) [程伟, 金智, 刘新宇. $f_t = 210\text{Gz}$ 的超高速 InP/InGaAs 单异质结晶体管. 半导体学报, 2008, 29(3):414]

[10] Liu Jun, Sun Lingling. III-V compound HBT modeling. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(11):2175 (in Chinese) [刘军, 孙玲玲. III-V 族化合物 HBT 建模. 半导体学报, 2005, 26(11):2175]

[11] Liu W. Handbook of III-V hetero-junction bipolar transistors. New York: Wiley, 1998

[12] Bude J, Hess K. Threshold of impact ionization in semiconductors. J Appl Phys, 1992, 72:3554

[13] Flicroft R M, David J P R, Houston P A. Avalanche multiplication in InGaP/GaAs single heterojunction bipolar transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45:1207

[14] Canali C, Forzan C, Neviani A, et al. Measurement of the electron ionization coefficient at low electric fields in InGaAs based heterojunction bipolar transistors. Appl Phys Lett, 1995, 66:1095

[15] Thomas S III, Foschaar J A, Fields C H. Effects of device design on InP-based HBT thermal resistance. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48:185

A SDD Model of Ultra High-Speed InP-Based SHBTs Including Improved Impact Ionization*

Ge Ji, Jin Zhi[†], Liu Xinyu, Cheng Wei, Wang Xiantai, Chen Gaopeng, and Wu Dexin

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper investigates the relationship between the impact ionization and temperature in ultra high-speed InP-based SHBTs. Considering the effect of temperature, an improved equation of the multiplication factor for InP-based HBTs is derived at an approximation of the electric field. A new SDD model including impact ionization and self-heating effects is developed for ultra high-speed InP-based SHBTs. The simulation result is consistent with the experimental data, indicating the accurate predictions of the model.

Key words: impact ionization; temperature dependent; ultra high-speed InP-based SHBTs; SDD model

PACC: 8160C; 9240C; 6185

Article ID: 0253-4177(2008)09-1799-05

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No.2002CB311902)

[†] Corresponding author. Email: jinzhi@ime.ac.cn

Received 27 March 2008, revised manuscript received 21 April 2008