

计算机辅助电路设计

潘明德 编著



复旦大学出版社

计算机辅助电路设计

潘明德 编著

复旦大学出版社

内 容 提 要

本书是在“计算机辅助电路设计”的讲义基础上改编而成的。全书共分七章,前五章介绍电路模拟的方法,后两章介绍有关电路设计的统计、优化方法。内容涉及到电路理论、网络图论、线性代数、数值积分、统计分析、回归正交设计、组合优化等知识,且将它们用于电路分析设计领域,本书还介绍了十年以来计算机辅助电路设计领域内某些新的成果,可以对以前出版的机辅分析方面的教材作一补充。除了理论知识和计算机算法以外,本书还以通用的电路模拟程序为例,简单介绍了电路分析程序的功能、组成及数据结构。

本书可作为高等院校有关专业学生或研究生的教材或参考书,也可供从事电子线路设计、生产的科技人员阅读参考。

计算机辅助电路设计

潘明德 编 著

责任编辑 林溪波

复旦大学出版社出版

(上海国权路579号)

新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 7.625 字数 224,000

1989年8月第1版 1989年8月第1次印刷

印数 1-3,000

ISBN7-309-00239-3/O·47

定价: 1.55 元

前 言

计算机辅助电路设计(Computer Aided Circuits Design, 简称 CAD) 是随着计算机的普及和集成电路的出现而迅速发展起来的一门学科。它熔电路理论、最优化方法、计算数学、计算机程序设计与软件工程于一体, 以设计用于电路分析、设计、测试、故障诊断的计算机软件为目的。

电路的计算机辅助设计(简称机辅设计)涉及的领域非常广。具体包括如下四个方面: 1. 数字逻辑电路的功能模拟、逻辑化简、测试生成、故障诊断; 2. 模拟电路的电路分析、灵敏度分析、容差分析和分配、合格率估计和最优中心设计; 3. 印刷电路和集成电路的布线布局、连通孔设计及自动制版; 4. 模拟及数字滤波器的机辅设计等。其内容所涉及到的数学方法是非常广泛的。本书侧重于模拟电路的 CAD, 且重点介绍其中的数学思想和算法。

电路的 CAD 是近十多年来飞速发展起来的领域。目前, 各种用途的实用软件、各种 CAD 工作站, 作为商品, 正以相当快的速度推向市场。对于这样一个飞速发展的领域, 本书难以对它的研究方法作一系统的概括, 只能介绍基本内容, 包括问题的提出、解决的办法、目前的困难及活跃的课题。从而读者可以了解这一领域的基本发展过程及目前的动态, 从中找到自己的兴趣所在, 投身于这一研究领域。目前的 CAD 课程有三个侧重面: 基本理论、计算机软件设计技巧及数学算法, 学习从事 CAD 专业也可以各有所好。

本书的内容是这样安排的: 计算机辅助电路分析(Computer Aided Circuits Analysis, 简称 CAA) 是 CAD 的基础, 所以我们首先介绍电路的直流分析、稳态分析、瞬态分析和灵敏度分析方法。然后, 再介绍 CAD 方面的主要课题、常用优化方法及考虑元件容差的统计

电路分析设计方法。

我们采用粗线条的叙述方法,突出问题的提出和解决问题的办法,有些方法可以在一般计算方法的书查到的就不再细述了。

目前,模拟电路 CAD 的进展比数字电路缓慢,其原因是:模拟电路工作情况复杂,基本上都是非线性电路,且所有元件都有偏差,这些偏差将影响整个电路的全部特性;更主要的困难是半导体器件及集成模拟电路块的广泛应用,系统功能多种多样,集成块的描述方法难以统一,半导体器件具有复杂的内部机理和外部特性,而可触及的测量端口又很有限。例如晶体三极管就有放大区、饱和区、截止区多种工作状态,又可分为小信号、大信号、非线性应用。根据有限端口上测得的参数而推算建立的模型其适用范围都很有限。模型与实际情况不符,将直接影响 CAA 的计算结果的精度,从而影响对此结果的可信度。所以,在模拟电路 CAD 中,半导体器件及模拟集成电路模型是最基本而又迫切的课题,但目前却又是最薄弱的。由于以上种种原因,模拟电路 CAD 领域中还有许多待开垦的土地,这正是目前全世界从事这一工作的科技人员的努力方向。

在电路 CAD 中遇到的问题在其他领域如机械、建筑 CAD 中也会遇到。本书介绍的有些计算机算法同样会适用于这些领域,本书也可作为其他领域 CAD 工作者的参考书,在问题的数学描述及解决方法上会对他们有所启发。

编者在 CAD 领域的研究工作是在凌雯亭教授指导下进行的,他对本书进行了最后的审定工作。编者在阅读 SPICE 源程序的过程中,也曾得到章开和副教授的许多帮助。在此向他们表示衷心的感谢。

目 录

前 言	1
第一章 计算机辅助电路分析概述	1
第一节 输入文件的编译	3
第二节 半导体器件模型	8
第三节 电路方程	20
第二章 直流分析	33
第一节 直流分析方程的特点	33
第二节 非线性方程组的解法	36
第三章 正弦稳态分析	51
第一节 线性代数方程组的解法	52
第二节 稀疏矩阵技术	62
第三节 符号函数法	78
第四章 瞬态分析	98
第一节 状态方程的建立	101
第二节 状态方程的求解	108
第三节 瞬态伴随模型	129
第四节 “第三代”模拟技术与松弛法	133
第五章 灵敏度分析	141
第一节 零极点灵敏度	142

第二节	德律根伴随网络.....	147
第三节	增量等效网络方法.....	155
第四节	回归正交法计算灵敏度.....	159
第六章	统计电路的分析设计.....	175
第一节	合格率估计.....	176
第二节	容差分析.....	186
第三节	容差分配.....	194
第四节	设计中心化.....	197
第七章	计算机辅助布线布局.....	202
第一节	动态规划.....	205
第二节	NP 完备问题及方法简介.....	222

第一章 计算机辅助电路分析概述

在接触 CAA 的具体方法以前,读者最好有机会先运行一个近年来 CAA 方面最通用的程序——SPICE,从而对计算机辅助电路分析有一个感性认识。

所谓电路分析,已知的是电路结构、各元件的标称值、有源器件可以从手册上或设计师那里得到的参数值、直流供电状态及交流信号激励状态,通过电路分析希望得到的是各种电路特性,如频响特性、电路对脉冲信号的瞬态响应、振荡器起振过程、电路功耗效率等。以前这类分析都是通过实验来完成的,因为实验结果要比人工估算可靠得多。

但在集成电路的设计、生产中,用实验板搭电路试验的传统方法受到了冲击。因为在集成电路投片以前,无法对电路作实际测试(电路还不存在),而分立元件电路又不能完全等效于集成电路,所以迫切要求用计算机作为辅助电路分析的工具,建立适用于电路分析的方程及算法,借助计算机的巨大计算能力,在电路设计完成以后并在投产之前,对设计进行各项指标考核。这样的考核是否可信,取决于计算机辅助分析结果是否与实际情况吻合。一个比较好的计算机辅助分析程序从产生到成熟,一般都经历了十来年检验、修改的过程。在集成电路发展的同时,计算机辅助分析程序也逐步充实、完善起来。

用计算机帮助电路分析的程序至少应包括四部分:

一、输入电路编译器

用户要将待分析电路的结构(即元件之间的联接方式)及元件值告诉计算机,让计算机能“读懂”电路图,电路分析程序应有一套自定的电

路描述语言及其编译器。更先进的 CAD 工作站具有图形编辑功能, 用户可以直接输入电路图, 图形编辑器会用 SPICE 规定的电路描述语言, 书写该电路的 SPICE 输入文件。

二、元器件模型库

晶体管等有源器件是非线性元件, 在电路分析时, 要用与它们性能等效的电路来代替它们。这样的等效电路称之为模型。在电路分析程序中, 一般都备有电阻、电容、电感、互感、独立电压电流源、受控源、传输线及四种半导体器件: 二极管、双极型晶体管、结型场效应管、MOS 场效应管等器件模型。先进的 CAD 工作站中还备有运算放大器、比较器、采样保持电路等小规模集成电路的宏模型, 而且以它们的型号为序建立了数据库, 可以用元件型号直接调用, 如 3 DG 6、 $\mu A 741$ 等。根据对电路分析不同精度的要求, 模型的复杂程度也可以作相应的选择, 在输入文件的模型语句中, 用类型项指明, 计算机将自动地把选定的模型“安装”到器件所连接的节点之间。

三、输出打印部分

电路分析程序具有许多功能, 用户对分析内容及输出结果都可以自由选择, 通过作业卡及输出打印卡告诉计算机。分析程序内的作业卡编译器及输出卡编译器将处理这些选择, 电路分析程序将提供用户需要的结果、曲线、表格。

四、分析计算部分

这是程序的核心部分, 包括完成所有分析功能的子程序。在这些子程序内包括各种具体算法及在运算速度、存储量、收敛性、精度等方面的种种考虑及其措施。

电路分析的主要功能有:

(1) 直流分析 计算电路静态工作点、直流传输特性、直流传递函数、器件的特性曲线、直流灵敏度。

(2) 交流小信号分析 计算电路的频率特性、相位特性、噪声功率及小信号失真。

(3) 瞬态分析 按用户规定的时间间隔计算瞬态波形，并且可以对输出波形进行傅里叶分析、给出傅里叶级数的系数。

(4) 给出不同温度下的以上三种分析。

根据用户所需分析的不同项目，由作业控制语句把用户的选择告诉计算机。

下面，我们以 SPICE 程序为例，介绍输入文件编译、数据结构、晶体管模型、电路方程等基本概念。各种分析中所用到的详细算法将在二~四章中分别进行介绍。

第一节 输入文件的编译

一、自由格式电路描述语言及其编译器

通常，一个实用化程序，其使用方便与否决定了程序的普及性和生命力。当然，用户使用越方便，程序本身也就越复杂。SPICE 采用的自由格式电路描述语言是一种比较方便的输入方式，而 CAD 工作站上电路草图直接输入方式是在方便用户方面的又一进步。

所谓自由格式，是相对固定格式而言的。早期的电路分析程序，电路的拓扑信息都是以数组方式读入的，用整型数组存放节点号，用实型数组存放元件值，用户键入电路信息时，次序与数组类型都不能搞错。

自由格式电路描述语言更符合用户的思维习惯，如：

R 1	1	2	1 kΩ
C 2	2	0	0.22 μF

分别表示电阻 R 1 接于节点 1 与节点 2 之间，电阻值为 1 kΩ。电容 C 2 接于节点 2 与地之间，电容值为 0.22 μF。输入文件编译器将所有内容作为字符方式读入，然后把语句中的信息转化为三种数据类型

型:元件名 R 1、C 2 为文字型变量,节点号为整型变量,元件值为实型变量,再将 k 、 μ 等约定的符号转化为 10^3 或 10^{-6} 与元件值相乘,分别对于不同类型元件,将所有数据存放于程序指定的数据结构里。

由于各类元件的信息量不同,处理也不同, SPICE 程序规定了各类元件的开头字母,电阻 R、电容 C、电感 L、互感 K、电压控制电压源 E、电压控制电流源 G、电流控制电压源 H、电流控制电流源 F、独立电压源 V、独立电流源 I、二极管 D、双极型晶体管 Q、结型场效应管 M、子电路 X、传输线 T。所有作业控制语句、结束语句、模型定义语句、可选项语句都以“.”开头,以此和元件描述语句区别。

每从输入文件中读入一行,首先辨认第一个字母,然后对各类元件分别处理存放。程序流程如图 1.1-1 所示。

在每个处理框内有一个共同的功能,就是要把字符转化为数——称为拼数。因为字符 1 与数字 1 的内部编码是不同的。为了避免各类机器内部编码的差异影响程序的通用性,拼数程序一般也用高级语言编写。下面用一个将字符串 IAQ 转化为整型数的流图 1.1-2 来说明拼数过程。

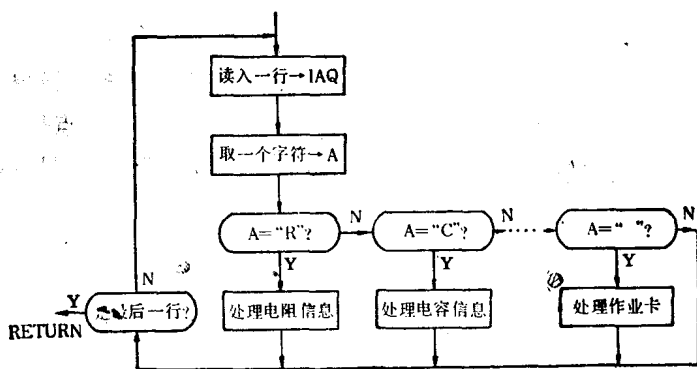


图 1.1-1

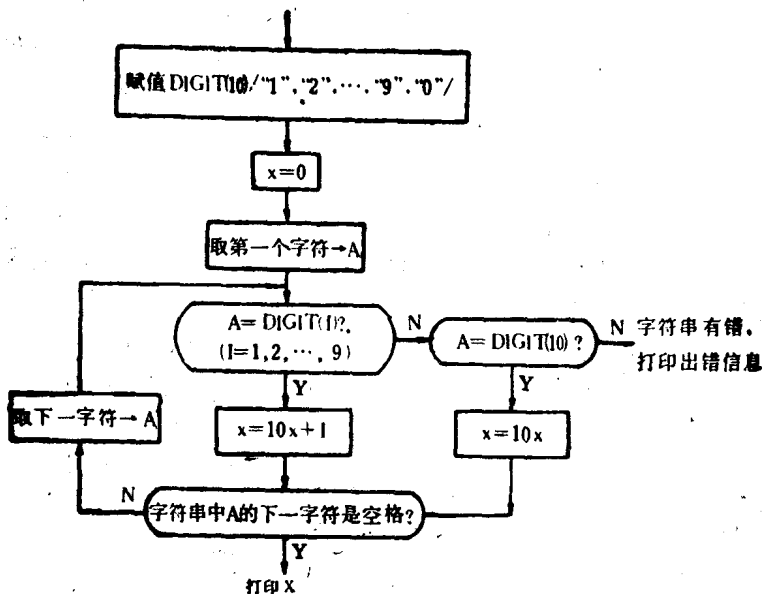


图 1.1-2

拼实数的原理与拼整数相同，只是要分小数点前及小数点后两部分分别处理，然后相加。

附录二

二、数据结构及动态内存管理

由于元件种类及性质不同，它们所需内存单元数是不同的。例如，有的元件是二端器件，有的是三端或四端器件，若用节点数组 $N1(\cdot)$ 、 $N2(\cdot)$ 来存放二端器件的两个节点，那么这样的数组该设几个才能适应所有电路形式？非线性元件的系数放在哪里？由于电路各不相同，元件种类繁多，势必造成数组繁多，且长短不一。SPICE 程序为了解决以上问题，采用一维数组存放所有数据，实型、整型、文字型变量都用等价语句使它们在一维数组中共存，又用一个数组专用存放指针，构成一个指针链。各类数据在一维数组中有秩序地排列，顺着指针链可以

很方便地找到所需信息。

例如 SPICE 中元件类型共有 15 种，则建立一维数组 LOCATE (15) 专门存放各类元件中第一个元件的存放地址。(若电路中不包含某类元件，则相应的 $\text{LOCATE}(I) = 0$ 。)而在此第一个元件的数据块中又包含了下一个元件的存放地址。下面以电阻为例，说明 SPICE 中的指针链与数据块。

LOCATE (1) 是编译器读电路输入文件时读到的第一个电阻在 NODPLC 数组中的位置，记 $\text{LOC} = \text{LOCATE}(1)$ 。LOC 所指数组 NODPLC 中一个数据块内分别存放：

$\text{NODPLC}(\text{LOC} + 0) =$ 下一个电阻的地址(新 LOC)

$\text{NODPLC}(\text{LOC} + 1) = \text{LOCV}$ ，LOCV 指向 VALUE 数组 (实型)中对应地址。

$\text{NODPLC}(\text{LOC} + 2) =$ 第一个节点号

$\text{NODPLC}(\text{LOC} + 3) =$ 第二个节点号

$\text{VALUE}(\text{LOCV}) =$ 元件名(文字型)

$\text{VALUE}(\text{LOCV} + 1) =$ 元件值

$\text{VALUE}(\text{LOCV} + 2) =$ 导纳值

$\text{VALUE}(\text{LOCV} + 3) =$ 温度系数

用图 1.1-3 来形象地说明指针链。方格内为存放内容。

数组 VALUE 与 NODPLC 在同一等价区内，实际上是在一维数组中交叉存放。省略号表示许多单元存放其他内容。如果输入文件中第一个电阻后面接着电容，那么该电容的数据块将紧接在第一个电阻的数据块之后。

有了这样的数据结构，可以很方便地找到所有元件的有关信息，存取和修改都很方便。由于各类元件需存放的信息量不同，它们所占的数据块长度也不相同。例如每个晶体二极管，在 NODPLC 中占 16 单元，在 VALUE 中只占 8 单元，它所用到的模型参数又在 VALUE 中占 19 单元。每个双极型晶体管在 NODPLC 中占 36 单元，在 VALUE 中占 22 单元，它所用到的模型参数在 VALUE 中占 40 个单元。只要知

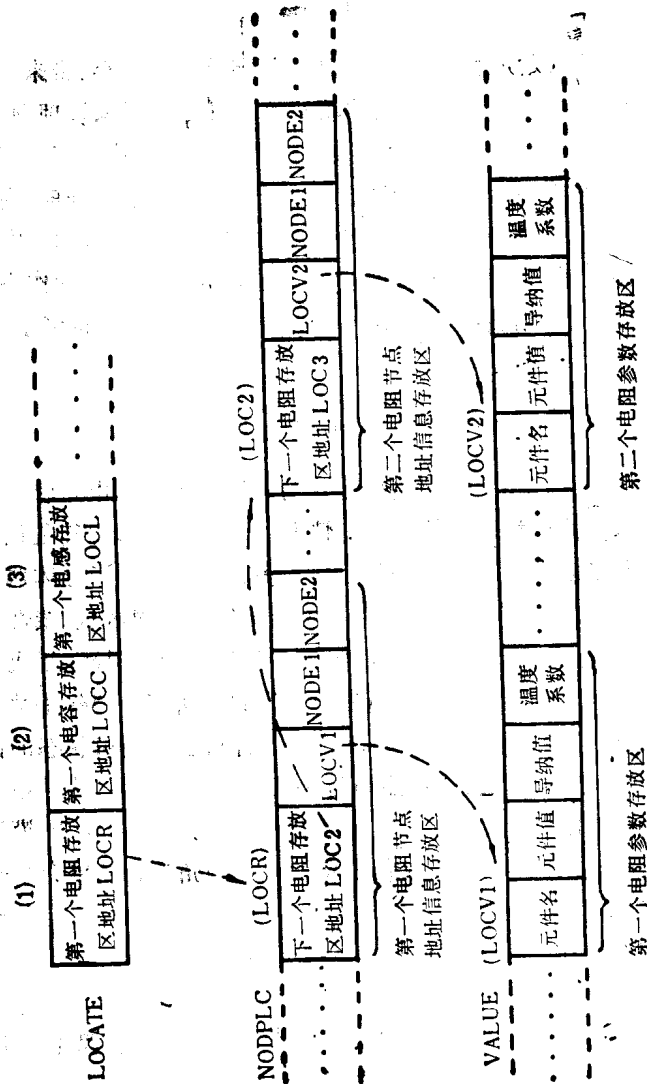


图 1.1-3

道某一管子的首地址 LOC, 可以通过指针链很方便地存放它的参数、电压电流、它在导纳阵中的位置, 又可以很方便地从中取出信息进行解方程运算。

当然, 由于一维数组存放, 整型、实型、字符变量共存, 带来了一系列管理上的麻烦。SPICE 有专门的动态内存管理程序来管理所有指针及内存。动态内存管理完成的主要功能是测量数据块长度, 移动或拷贝数据块, 释放数据块等等。动态内存管理使内存使用合理, 在一定的计算机容量下, 可算电路规模大, 对电路的制约少。同时动态内存管理也带来了指针过多、程序可读性差等缺点。新的计算机操作系统具有虚拟存储功能, 比用高级语言实行动态内存管理又方便得多了。

第二节 半导体器件模型

一个电路分析程序的运算结果能否精确地模拟实际电路状态, 关键在于半导体器件模型是否符合实际情况。非线性电路, 尤其是包含半导体器件的电路模拟比线性电路要困难得多, 这是因为半导体器件的物理特性复杂, 在实际应用中, 它们又可能工作在不同区域(线性放大区、饱和区、截止区等), 要想用由电阻、电容、二极管、受控源组成的电路来等效半导体器件特性是十分困难的。为此, 研究者们作了数十年的努力, 曾经得到了无数的经验公式, 建立了针对各自使用状态的许多模型。读者在学习电子线路时可能用过小信号 H 参数模型, 就是在小信号条件下三极管的一个简单模型。一般说, 考虑的情况越复杂, 模型的复杂程度也越高。现在, 我们仅从电路设计者的角度, 简单介绍一下目前常用的半导体器件模型。

一、结型二极管模型

图 1.2-1 中画出了 PN 结二极管的交流全局模型, 模型中有五个元件:

1. R_B : 半导体体电阻和接触电阻。典型值为

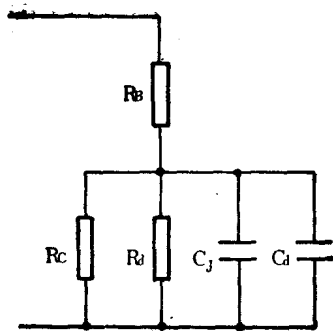


图 1.2-1

$$0 < R_B < 100(\Omega).$$

2. R_C : 结的漏电阻。典型值为

$$R_C > 1 \text{ MEG}(\Omega)$$

3. R_d : 二极管 PN 结的非线性电阻, 由 V_d - I_d 特性决定其值。

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{q}{n} \cdot \frac{V_d}{kT}} - 1 \right), \quad (1.2-1)$$

其中 I_s 为二极管饱和电流。典型值: 硅管 $10^{-12} \text{ mA} < I_s < 10^{-6} \text{ mA}$;

锗管 $10^{-8} \text{ mA} < I_s < 10^{-2} \text{ mA}$;

q 为电子电荷, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$;

k 为波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

T 为结的开氏绝对温度;

n 为发射常数, 典型值为 1 或 2。

4. C_J : 耗尽层的非线性势垒电容

$$C_J = \frac{C_{J0}}{\left(1 - \frac{V_d}{\phi_d} \right)^m}, \quad V_d < \phi_d \quad (1.2-2)$$

其中 C_{J0} 为二极管零偏置势垒电容;

ϕ_d 为二极管自建电势, 典型值: 硅 0.3~0.5 V, 锗 0.7~0.8 V;

m 为结电容梯度因子, 典型值 $0 < m < 1$ 。

5. C_d : 非线性扩散电容, 其值取决于结电流 I_d :

$$C_d = \frac{\tau_1 q}{nkT} (I_d + I_s), \quad (1.2-3)$$

其中 τ_1 为渡越时间。

总之, 二极管模型包含五个元件, 8 个物理参数: $I_s, R_B, R_C, n, C_{JO}, \phi_d, m, \tau_1$ 。它们是由器件的工艺条件决定的, 一般都用测量的方法得到。

二、双极型晶体管 (BJT) 的物理模型

常用的有 Ebers-Moll 模型(简称 EM 模型)及 Gummel-Poon 积分电荷控制模型。EM 模型, 按其复杂程度由低到高可分为 EM_1 、 EM_2 、 EM_3 模型。复杂程度不同的 EM 模型其适用性不同。 EM_1 模型适用于一般直流分析。 EM_2 模型在精度与计算速度方面有较好的折衷。 EM_3 模型最复杂, 一般仅用于对精度有特殊要求的场合。

1. EM_1 模型

模型如图 1.2-2 所示。其中不包含电容, 是最简单的直流全局模型。

图 1.2-2 中, (b) 图是以两个 PN 结注入电流 I_R, I_F 为参考电流的, 故称其为注入型 EM_1 模型。(c) 图是以晶体管少数载流子正反向传输电流 I_{CO} 和 I_{EO} 为参考电流的, 故称其为传输型 EM_1 模型。图中各符号含义是:

$$I_F = \frac{I_{CC}}{\alpha_F} = \frac{I_{EO}}{1 - \alpha_F \alpha_R} \left(e^{\frac{q}{kT} V_{BE}} - 1 \right), \quad (1.2-4)$$

$$I_R = \frac{I_{EC}}{\alpha_R} = \frac{I_{CO}}{1 - \alpha_F \alpha_R} \left(e^{\frac{q}{kT} V_{BE}} - 1 \right), \quad (1.2-5)$$