

文章编号 1000-5013(2003)04-0415-04

压控晶体二极管非线性电阻解析表达式

王建成 明 杨 许碧惠 向 菲

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362011)

摘要 利用场论说推导出的非线性电阻特性普遍公式, 对可作为非线性电阻的晶体二极管, 推导出电流作为电压的函数解析式. 为工程上使用晶体二极管的解析表达式, 提供理论依据.

关键词 场论说, 非线性电阻, 晶体二极管

中图分类号 TM 15 TN 111.02 TN 310.10 241.82

文献标识码 A

场论说^[1], 它是把属于不同学科的物理电动力学及电工网络理论, 有机地结合起来. 在网络理论中, 提出‘网络场论说’学术思想. 主张电网络理论的基础应彻底和完全建立在麦克斯韦方程组基础上, 并运用纯逻辑推理, 去演绎从线性网络到非线性网络中的有关问题. 本文利用场论说, 推导出非线性电阻特性普遍公式^[2]. 对可作为非线性电阻器的晶体二极管, 推导它们的非线性电阻的电流作为电压的函数解析式. 这就为工程上使用非线性电阻的解析表达式, 提供了理论依据.

1 非线性电阻的数学模型

场论说已给出倒电导与倒电导张量分量之间的关系^[3], 即

$$\frac{1}{G} = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \left(\frac{1}{G} \right)_{mn} \cos^2(j, e_n). \quad (1)$$

在式(1)中

$$\left(\frac{1}{G} \right)_{mn} = \frac{l_m}{0} \frac{h_m du_m}{(\sigma_{mn}^{(0)} + \sigma_{mn}^{(1)} + \dots + \sigma_{mn}^{(k)} + \dots) S_m(u_1, u_2, u_3)}, \quad m = 1, 2, 3. \quad (2)$$

$S_m (m=1, 2, 3)$ 是等位面 S , 其在广义正交坐标系变量 u_1, u_2, u_3 为常数的坐标面上的投影; $h_m (m=1, 2, 3)$ 称为广义正交坐标的度量系数. 有

$$\begin{aligned} \sigma_{mn}^{(1)} &= \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \sigma_{mnl} (\hat{E}_l + \hat{E}_l^*), \\ \sigma_{mn}^{(2)} &= \frac{1}{4} \sum_{l=1}^3 \sum_{p=1}^3 \sigma_{mnp} (\hat{E}_l \hat{E}_p + 3 \hat{E}_l \hat{E}_p^*), \end{aligned} \quad (3)$$

依次称为非线性一级、非线性二级……电导率张量. 它们都是电场强度的函数.

收稿日期 2003-02-22

作者简介 王建成(1943-), 男, 教授, E-mail: wangjc@hqu.edu.cn

基金项目 华侨大学科研基金资助项目(H011)

为了方便起见,把晶体二极管视为非线性电阻器.它可用长为 h 、横截面积为 S 的圆柱形实体非线性电阻器来等效.设组成该电阻器的非线性介质的 3 个主轴与柱坐标的 3 个轴一致,与电阻器轴线平行的介质主轴为柱坐标的 Z 轴.那么,当电流仅沿此轴的正方向流动时,有

$$\left(\frac{1}{G}\right)_{mn} = 0(m \neq n), \quad \cos(\mathbf{j}, \mathbf{e}_r) = \cos(\mathbf{j}, \mathbf{e}_\theta) = 0, \quad \cos(\mathbf{j}, \mathbf{e}_z) = 1.$$

若令

$$\sigma_{mn} = \sigma_{mn}^{(0)} + \sigma_{mn}^{(1)} + \dots + \sigma_{mn}^{(k)} + \dots, \quad m, n = 1, 2, 3, \quad (4)$$

则由式(1)和式(2)可得

$$\frac{1}{G} = \frac{h}{\int_0^h \sigma_{zz} dz S}. \quad (5)$$

采用实数形式时,根据式(3)和式(4),可把式中的 σ_{zz} 表为

$$\sigma_{zz} = \sum_{i=0}^n \sigma_i E^i, \quad (6)$$

式中

$$\sigma_0 = \sigma_{zz}^{(0)}, \quad \sigma_1 = \sigma_{zzz}, \quad \dots \quad (7)$$

如等效条件 $E = \frac{V}{h}$, 则把式(6)代入式(5),得

$$G = \sum_{i=0}^n \frac{S \sigma_i}{h^{i+1}} V^{i+1}. \quad (8)$$

那么,电容可表示为电压的多项式形式.如非线性电阻器是压控的,则其微变电导为

$$G = \frac{dI(V)}{dV}.$$

设 $V = 0, I = 0$ 时,由以上两式消去 G (因 S 为常数),积分后便得出压控非线性电阻器的多项式.可将其表示为

$$I = \sum_{i=0}^n b_{i+1} V^{i+1}. \quad (9)$$

在式(9)中

$$b_{i+1} = \frac{\sigma_i S}{(i+1)h^{i+1}} = \frac{S}{(i+1)h^{i+1}} \sigma_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

由式(9)可知,若能用给定的一组实验数据 (V_i, I_i) , $i = 0, 1, 2, \dots$ 拟合一个多项式,则由式(10)可求出 σ_i .进而,由式(7)可得出各级非线性电导率张量.

2 曲线拟合的原理与实现

对非线性电阻器,设有一组 n 个实验点 (V_i, I_i) , $i = 1, 2, \dots, n$.现用 m 次多项式

$$I = P_m(V) = b_0 + b_1 V + b_2 V^2 + \dots + b_m V^m,$$

拟合这一组数据,多项式的次数 $m < n-1$.采用最小二乘法拟合,即使这个多项式在各个 V_i 处的值与实验值 I_i 之差的平方和为 Q .即

$$Q = \sum_{i=1}^n (P_m(V_i) - I_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=0}^m b_j V_i^j - I_i \right]^2$$

极小.在 Q 的表达式中, V_i, I_i 是已知的,因此把 Q 看作多项式系数 b_j ($j = 0, 1, 2, \dots, m$) 的函数.相对于 b_k ,求 Q 的偏微商并令之为 0,有

$$\frac{\partial Q}{\partial k}=2\sum_{i=1}^n[\sum_{j=0}^mb_jV_i^j-I_i]V_i^k.$$

即

$$\frac{\partial Q}{\partial k}=2(\sum_{j=0}^mb_j\sum_{i=1}^nV_i^{j+k}-\sum_{i=1}^nI_iV_i^k)=2(\sum_{j=0}^mb_jP_{j+k}-t_k)=0,$$

其中

$$P_j=\sum_{i=1}^nV_i^j,\quad t_k=\sum_{i=1}^nI_iV_i^k. \tag{11}$$

因此, 最小二乘法拟合的多项式系数满足

$$\sum_{j=0}^mb_jP_{j+k}=t_k,\quad k=0,1,2,\dots,m. \tag{12}$$

求出系数, 便可得到拟合的压控多项式. 进而利用式(10)和式(7), 可求出给定的非线性电阻的各级电导率张量.

3 晶体二极管 2AP14 的解析表达式

下面以压控晶体二极管 2AP14 为例, 根据实验特性数据, 推导电流(I_0 作为电压(U) 的函数解析式. 根据 2AP14 实验曲线, 获得如表 1 所示数据

表 1 2AP14 实验特性数据表

序号	I/mA	U/V	序号	I/mA	U/V
1	0	0	4	13	0.6
2	2	0.2	5	25	0.8
3	6	0.4	6	50	1.0

分别用二次和五次多项式, 利用 Matlab 程序进行曲线拟合. 拟合的结果, 如图 1, 2 所示. 显然, 五次多项式拟合的效果要好一些, 它的系数 $b_j(j=0,1,\dots,5)$ 如表2所示. 所以, 与晶体

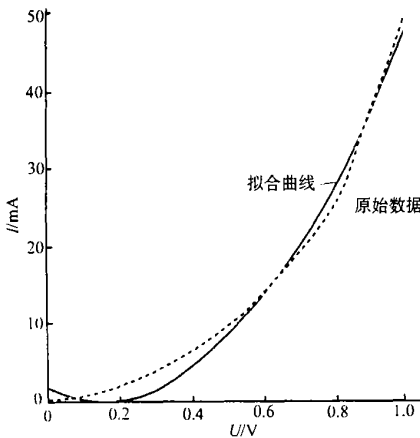


图 1 采用二次多项式的拟合曲线

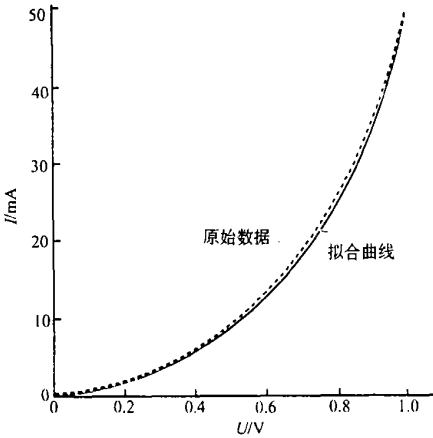


图 2 采用五次多项式的拟合曲线

表 2 系数表

b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0
1.30×10^2	-2.34×10^2	1.72×10^2	-2.81×10^1	1.04×10^1	4.09×10^{-16}

二极管 2AP14 相当的实体非线性电阻器的电流, 作为电压函数的解析表达式为

$$I = 1.30 \times 10^2 V^5 - 2.34 \times 10^2 V^4 + 1.72 \times 10^2 V^3 - 2.81 \times 10^1 V^2 + 1.04 \times 10^1 V. \quad (13)$$

式(13)的单位为 mA, 其中 b_0 忽略不计. 设 S 为单位面积, h 为单位长度, 则利用式(10)与式(7), 可求得非线性电阻的各级电导率张量. 当 $i=0$ 时, 有

$$\sigma_{zz}^{(0)} = 1.04 \times 10^1; \quad (14a)$$

当 $i=1$ 时, 有

$$\sigma_{zzz} = 2b_2 = -5.62 \times 10^1; \quad (14b)$$

当 $i=2$ 时, 有

$$\sigma_{zzzz} = 3b_3 = 5.16 \times 10^2; \quad (14c)$$

当 $i=3$ 时, 有

$$\sigma_{zzzzz} = 4b_4 = -9.36 \times 10^2; \quad (14d)$$

当 $i=4$ 时, 有

$$\sigma_{zzzzzz} = 5b_5 = 6.50 \times 10^2. \quad (14e)$$

参 考 文 献

- 1 陈 年, 何煜光. 非线性网络与线性网络统一的场论说[J]. 中国科学(A 辑), 1994, 24(12): 1 316~1 326
- 2 陈 年, 王建成. 从线性到非线性的四种基本电子元件特性普遍公式[J]. 科学通报, 1993, 38(16), 1 527~1 531
- 3 陈 年, 陈思明, 王建成. 从麦克斯韦方程组建立的新电路理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 210~302

Analytical Expression of Voltage-Controlled Crystal Diode as Non-Linear Resistance

Wang Jiancheng Ming Yang Xu Bihui Xiang Fei

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

Abstract A general formula for the specific property of non-linear resistance is derived by applying field theoretical teachings. Electric current as analytic expression of the function of electric voltage can be derived from crystal diode as non-linear resistance. Theoretical basis is thus offered for applying analytic expression of crystal diode to engineering.

Keywords field theoretical teachings, non-linear resistance, crystal diode