

# 基于 $C-V$ , $I-V$ , $Q-V$ 特性的铁电电容新模型<sup>\*</sup>

陈小明 汤庭鳌

(复旦大学微电子学系 ASIC 和系统国家重点实验室, 上海 200433)

**摘要:** 推导出描述铁电电容电气特性的新模型. 铁电电容可以等效为开关电容(电畴电容)和非开关电容(普通线性电容)的并联, 而电畴电容可以看作是由电偶极子组成的铁电材料、上电极和下电极组成. 根据实验测试的铁电电容的  $C-V$  特性, 选定电偶极子矫顽电压的概率密度函数为  $t$  分布, 从而推导出只用 6 个参数描述的铁电电容的  $C-V$ ,  $I-V$  和  $Q-V$  关系式, 根据这些关系式仿真的结果与实验结果基本吻合.

**关键词:** 铁电电容; 模型;  $C-V$  特性; 电偶极子; 概率密度函数

**EEACC:** 0240Z; 2860F

**中图分类号:** TN304      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2005)05-0983-07

## 1 引言

铁电存储器 (FeRAM) 由于具有不挥发性、低的读写电压、低功耗的特点, 因此是航空、移动电子产品中 EEPROM 和 FLASH 的潜在替代者<sup>[1]</sup>. 国际上知名的半导体企业如三星、富士通、德州仪器、Ramtron 都在进行铁电存储器的商业开发<sup>[2]</sup>. 也正是由于铁电存储器的这些特点及其广阔的商业应用前景, 2001 年的 ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) 收录了 FeRAM 发展指南<sup>[3]</sup>.

铁电存储器的设计需要铁电电容模型, 目前较为实用的铁电电容模型分为两类: Miller 模型<sup>[4,5]</sup> 及其改进型<sup>[6-11]</sup>; Kim 模型<sup>[12]</sup> 及其应用型<sup>[13]</sup>.

Miller 模型根据实验数据来确定铁电电容的  $Q-V$  关系, 模型使用参数较多. Kim 模型基于铁电电容畴矫顽电压的概率密度函数推导出铁电电容的  $Q-V$ ,  $C-V$  关系, 模型使用参数较少.

这两类模型都是基于铁电电容的  $Q-V$  特性曲线(即电滞回线)建立的. 根据模型仿真的铁电电容  $C-V$  特性有一个缺点: 在电压的绝对值增大到一定的值后, 其电容值趋于恒定. 这与实验结果不符.

基于 Preisach 模型(对象由具有类似特性的基本元素组成)<sup>[14]</sup>, Evans 根据铁电畴矫顽电压的概

率密度函数建立了铁电电容的模型<sup>[15]</sup>. Bartic 也提出了类似的模型, 且具有较快的速度<sup>[16]</sup>. 这两种模型的共同缺陷是需要记忆极化的转向点. Farag 基于铁电体是电偶极子的集合, 并考虑电偶极子之间的相互作用, 用蒙特卡罗方法模拟了铁电电容的电滞回线, 但只有仿真结果<sup>[17]</sup>. Potter 基于铁电体是畴的集合, 而畴又是电偶极子的集合, 根据畴壁的势能来仿真铁电电容的电滞回线, 也只有仿真结果<sup>[18]</sup>. 此外, 还有许多人基于 Preisach 模型来研究铁电电容的模型<sup>[19-21]</sup>, 要么得到与 Miller 模型类似的模型, 要么模型只有仿真结果, 没有实验结果.

本文基于铁电体是电偶极子的集合, 根据测试的铁电电容的  $C-V$  特性, 选定电偶极子矫顽电压的概率密度函数, 从而推导出了铁电电容的模型, 且仿真结果和实验结果基本吻合.

## 2 铁电电容的等效电路

在外电场作用下, 铁电电容的电荷由以下三部分组成: (1) 电畴反转引起的电畴电荷  $Q_a$ ; (2) 铁电材料也是一种介质, 存在感应极化, 由感应极化引起的感应电荷; (3) 介质为真空时的电荷.

将第一部分的电荷对应的电容定义为电畴电容, 用  $C_a$  表示. 后两部分的电荷之和  $Q_n$  对应的电容定义为普通电容, 用  $C_n$  表示.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金, 应用材料 AM 基金, 国防科技预研和 PDC 基金资助项目

与普通电容一样,铁电电容也存在漏电流.将铁电电容漏电流的影响等效为漏电流电阻  $R_L$ ,则铁电电容的等效电路如图 1(a)所示.若铁电电容的漏电流很小,则漏电流电阻  $R_L$  可以忽略,则铁电电容的等效电路如图 1(b)所示.

铁电电容之所以具有不同于普通电容的性质,就是因为其电畴电容.实际的铁电电容的漏电流一般很小,因此常使用图 1(b)所示的铁电电容等效电路.

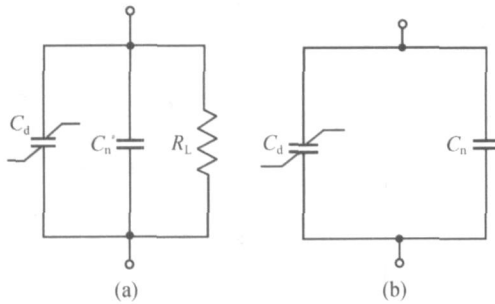


图 1 铁电电容的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of ferroelectric capacitors

### 3 铁电电容新模型

#### 3.1 电畴电容极化电荷与其电偶极子极化概率的关系

铁电电容的自发极化是由电畴电容决定的,铁电电容建模的关键是电畴电容.将电畴电容看作是电偶极子的集合,且将电偶极子理想化<sup>[22,23]</sup>:电偶极子的极化互相平行;电偶极子之间没有相互作用;电偶极子只有方向相反的两种极化状态;电偶极子的总数固定不变.

记任一时刻电偶极子正向极化、反向极化的概率分别为  $P_+$ ,  $P_-$ , 则:

$$P_+ + P_- = 1 \tag{1}$$

记  $Q_{d+}$ ,  $Q_{d-}$  分别是同一时刻电畴电容正向极化、反向极化电偶极子的极化电荷之和 ( $Q_{d-} < 0$ , 表示反向极化), 则:

$$Q_{d+} = P_+ Q_s \tag{2}$$

$$Q_{d-} = - P_- Q_s \tag{3}$$

记  $Q_d$  是该时刻电畴电容的极化电荷, 则:

$$Q_d = Q_{d+} + Q_{d-} = P_+ Q_s - P_- Q_s = (2 P_+ - 1) Q_s \tag{4}$$

记  $Q_s$  是电畴电容的自发极化电荷, 其大小为所有电偶极子正向极化时的极化电荷之和 ( $Q_s$  与所有电偶极子反向极化时的极化电荷之和大小相等, 符号相反).

$$Q_s = Q_{d+} - Q_{d-} \tag{5}$$

根据 (4), (5) 两式可求得:

$$Q_{d+} = \frac{Q_d + Q_s}{2} \tag{6}$$

$$Q_{d-} = \frac{Q_d - Q_s}{2} \tag{7}$$

#### 3.2 电畴电容极化电荷、电容与其电偶极子矫顽电压概率密度函数的关系

记电偶极子正、负矫顽电压的概率密度函数分别为  $f_+$ ,  $f_-$ , 且假定无论电畴电容的初态如何变化, 这两个概率密度函数不变. 记  $V_i$  是初始时刻电畴电容的电压,  $Q_{di}$  是初始时刻电畴电容的极化电荷,  $Q_{di+}$  是初始时刻电偶极子正向极化电荷之和,  $Q_{di-}$  是初始时刻电偶极子反向极化电荷之和, 则根据 (6), (7) 两式可得:

$$Q_{di+} = \frac{Q_{di} + Q_s}{2} \tag{8}$$

$$Q_{di-} = \frac{Q_{di} - Q_s}{2} \tag{9}$$

下面分别推导电压增加和减小时电畴电容的电荷、电容随电压变化的关系式.

(1) 电畴电容的电压从  $V_i$  开始增加 ( $dV/dt > 0$ )

电畴电容电压从  $V_i$  增加到  $V$ , 正向极化的电偶极子增加的概率为:

$$P_+ = \int_{V_i}^V f_+(V) dV \tag{10}$$

电畴电容电压从  $V_i$  增加到  $V$ , 电偶极子全部正向极化, 其极化电荷的增加量就是初始时刻电偶极子反向极化电荷之和:

$$Q_+ = - Q_{di-} \tag{11}$$

设  $Q_s$  为铁电电容在上述初始条件下的准自发极化电荷.  $Q_s$  和  $Q_{di}$  满足:

电畴电压从  $V_i$  增加到  $V$ , 极化电荷的增加量是  $Q_{di+}$ ; 电畴电压从  $V_i$  增加到  $V$ , 极化电荷的增加量是  $Q_s$ .

则根据 (10) 式, 有:

$$P_+ Q_s = - Q_{di-} \tag{12}$$

将 (9) 式代入上式并变形可得:

$$Q_s = \frac{-Q_{di}}{P} = \frac{Q_s - Q_{di}}{2 \int_{V_i}^V f(V) dV} \quad (13)$$

若电畴电容由  $V_i$  增加到  $V$  ( $dV/dt > 0$ ) ,则:

$$P(V) = \int_{V_i}^V f(V) dV \quad (14)$$

$$Q(V) = Q_s - P(V) = \frac{Q_s - Q_{di}}{2 \int_{V_i}^V f(V) dV} \int_{V_i}^V f(V) dV \quad (15)$$

$$Q_d(V) = Q_{di} + Q(V) = Q_{di} + \frac{Q_s - Q_{di}}{2 \int_{V_i}^V f(V) dV} \int_{V_i}^V f(V) dV \quad (16)$$

(2) 若电畴电容的电压从  $V_i$  开始减小( $dV/dt < 0$ )

与(1)类似,在电畴电容的电压由  $V_i$  减小到  $V$  时,有:

$$P(V) = \int_V^{V_i} f(V) dV \quad (17)$$

$$Q(V) = Q_s - P(V) = \frac{Q_s + Q_{di}}{2 \int_V^{V_i} f(V) dV} \int_V^{V_i} f(V) dV \quad (18)$$

$$Q_d(V) = Q_{di} - Q(V) = Q_{di} - \frac{Q_s + Q_{di}}{2 \int_V^{V_i} f(V) dV} \int_V^{V_i} f(V) dV, \quad dV/dt < 0 \quad (19)$$

由(16),(19)式可得电畴电容与电压的关系式为:

$$C_d(V) = \frac{dQ_d(V)}{dV} = \frac{Q_s - Q_{di}}{2 \int_{V_i}^V f(V) dV} f(V), \quad \frac{dV}{dt} > 0 \quad (20)$$

$$C_d(V) = \frac{dQ_d(V)}{dV} = \frac{Q_s + Q_{di}}{2 \int_V^{V_i} f(V) dV} f(V), \quad \frac{dV}{dt} < 0 \quad (21)$$

### 3.3 铁电电容电荷、电流、电容与电压的关系

如图 1(b) 所示,假定  $C_n$  为线性电容,根据(16),(19)~(21)式可得铁电电容电荷、电流、电容的表达式分别为:

$$Q_F(V) = Q_d(V) + Q_n(V) = Q_{di} + \frac{Q_s - Q_{di}}{2 \int_{V_i}^V f(V) dV} \int_{V_i}^V f(V) dV + C_n V, \quad \frac{dV}{dt} > 0 \quad (22)$$

$$Q_F(V) = Q_d(V) + Q_n(V) = Q_{di} + \frac{Q_s + Q_{di}}{2 \int_V^{V_i} f(V) dV} \int_V^{V_i} f(V) dV + C_n V, \quad \frac{dV}{dt} < 0 \quad (23)$$

$$I_F = \frac{dQ_F}{dt} \quad (24)$$

$$C_F(V) = C_d(V) + C_n = \frac{Q_s - Q_{di}}{2 \int_{V_i}^V f(V) dV} f(V) + C_n, \quad \frac{dV}{dt} > 0 \quad (25)$$

$$C_F(V) = C_d(V) + C_n = \frac{Q_s + Q_{di}}{2 \int_V^{V_i} f(V) dV} f(V) + C_n, \quad \frac{dV}{dt} < 0 \quad (26)$$

这样建立的铁电电容模型的关键是确定电畴电容电偶极子矫顽电压的概率密度函数。

### 3.4 铁电电容的新模型

根据统计概率理论和铁电材料电偶极子理论,若电畴电容的电压变化  $V$ ,其矫顽电压概率密度函数表示其电偶极子极化状态变化的概率与  $V$  的比值,与其极化电荷的变化量相当.而电容是电荷对电压的微分,因此电畴电容矫顽电压的概率密度函数与电畴电容  $C_d$  相当。

常用的随机变量是高斯分布、柯西分布、t 分布,其概率密度函数分别为<sup>[24]</sup>:

$$p_g(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-v^2/2) \quad (27)$$

$$p_c(v) = \frac{1}{\pi} \times \frac{1}{1 + 4v^2} \quad (28)$$

$$p_t(v) = \frac{\Gamma(\frac{A}{2})}{\sqrt{A} \Gamma(\frac{A+1}{2})} \times \frac{(A+1)}{(1 + \frac{v^2}{A})^{\frac{A+1}{2}}} \quad (29)$$

式中  $A = 1$ ,  $\Gamma(x)$  的定义如下:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt \quad (30)$$

图 2 是上述三个随机变量概率密度函数归一化(函数  $f(x)$  的归一化函数为  $f(x)$  除以  $f(x)$  的最大值)后的曲线,随着  $V$  绝对值的增大,高斯分布和柯西分布的概率密度函数很快趋于“0”,而  $t$  分布的概率密度函数在减小,但没有趋于“0”。根据实验结果(见图 5 的实线),在  $V$  绝对值增大到较大的值后,电容值还在减小,因此选择  $t$  分布来描述矫顽电压的概率密度函数。

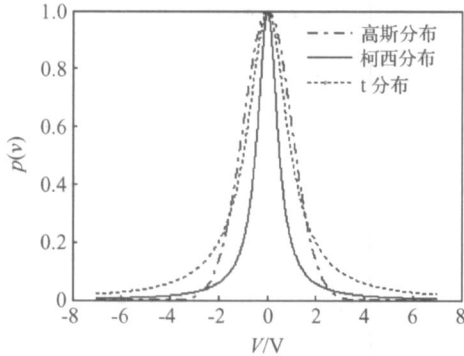


图 2 三种随机变量归一化后的概率密度函数

Fig. 2 Probability density functions of three random variables

用  $t$  分布构建的电偶极子正、负矫顽电压的概率密度函数分别如下:

$$f(V, A_+) = \frac{1}{\sqrt{A_+}} \frac{1}{\left(\frac{A_+}{2}\right)} \times \frac{\left(\frac{A_+ + 1}{2}\right)}{\left[1 + \frac{(V - V_+)^2}{A_+}\right]^{\frac{A_+ + 1}{2}}} \quad (31)$$

$$f(V, A_-) = \frac{1}{\sqrt{A_-}} \frac{1}{\left(\frac{A_-}{2}\right)} \times \frac{\left(\frac{A_- + 1}{2}\right)}{\left[1 + \frac{(V - V_-)^2}{A_-}\right]^{\frac{A_- + 1}{2}}} \quad (32)$$

式中  $V_+, A_+, V_-, A_-$  是为了构建矫顽电压的概率密度函数而引入的,其中  $V_+, V_-$  可视为宏观的矫顽电压。

这样,通过 6 个参数  $V_+, A_+, V_-, A_-, C_n$  和  $Q_s$ ,以及电畴电容的初始条件  $Q_{di}$ ,利用 (22) ~ (26) 式可以求得铁电电容在任意电压作用下的电荷、电流和电容。

## 4 实验结果和仿真结果的比较

### 4.1 实验方法

如图 3 所示,选择  $R$  足够小使得  $V_x \gg V_y, V_s$

为正弦波,由 Agilent 33250A 产生,如图 4 所示,采样时刻  $t, V_x$  和  $V_y$  由 Agilent 54622A 采集,则铁电电容电流和电压分别为:

$$I_F = \frac{V_y}{R} \quad (33)$$

$$V_F = V_x - V_y \quad V_x \quad (34)$$

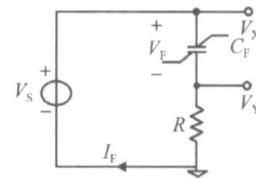


图 3 铁电电容和线性电阻串联电路

Fig. 3 Circuit of a ferroelectric capacitor in series with a linear resistor

铁电电容电压、电流的对称分量分别用以下两式计算:

$$V_{FS}(t) = \frac{V_F(t) - V_F(T-t)}{2} \quad (35)$$

$$I_{FS}(t) = \frac{I_F(t) - I_F(T-t)}{2} = \frac{V_y(t) - V_y(T-t)}{2R} \quad (36)$$

式中  $T$  是测试时间,如图 4 所示。

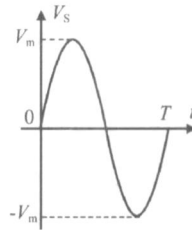


图 4 激励  $V_s$

Fig. 4 Signal  $V_s$

利用以下公式计算铁电电容的电荷:

$$Q_{FS}(t) = \int_0^t I_{FS}(\tau) d\tau \quad (37)$$

$$Q_{rs} = \frac{\max(Q_{FS}) + \min(Q_{FS})}{2} \quad (38)$$

$$Q_{FS}(t) = Q_{FS}(t) + Q_{rs} \quad (39)$$

铁电电容的极化是对称(或铁电电容的极化非对称性较小)时,利用 (38) 式来计算剩余极化电荷没有误差(或误差较小)。

铁电电容的电容值为:

$$C_{FS} = \frac{d[Q_{FS}]}{dV_{FS}} \quad (40)$$

### 4.2 实验结果和仿真结果

表 1 为铁电电容的性能测试条件,利用(33)~(40)式根据实验数据提取铁电电容的对称分量,进而绘制铁电电容的  $C-V, I-V, Q-V$  特性曲线,分别如图 5~7 中实线所示,提取的铁电电容模型参数如表 2 所示.由于根据铁电电容极化的对称分量提取参数,因而有: $V_- = -V_+$ ,  $A_+ = A_-$ .

表 1 铁电电容性能测试条件

Table 1 Conditions for measuring ferroelectric capacitors' characteristics

铁电电容	PZT
测试电路	铁电电容与线性电阻串联电路, $R=5.1k$
激励	正弦波,频率 1kHz,幅度为 1,3 和 5V

表 2 铁电电容的模型参数

Fig. 2 Parameters of the ferroelectric capacitors' model

参数	参数取值	参数	参数取值
$Q_s$	5.0nC	$C_n$	0.3nF
$V$	1.4V	$V$	-1.4V
$A_+$	0.8	$A_-$	0.8

利用表 2 的铁电电容模型参数,在铁电电容电压为表 1 所示的激励时,将(31),(32)式代入(25),(26),(24),(22),(23)式可以分别仿真铁电电容的电容、电流、电荷,然后绘制铁电电容的  $C-V, I-V, Q-V$  特性曲线,分别如图 5~7 中虚线所示.

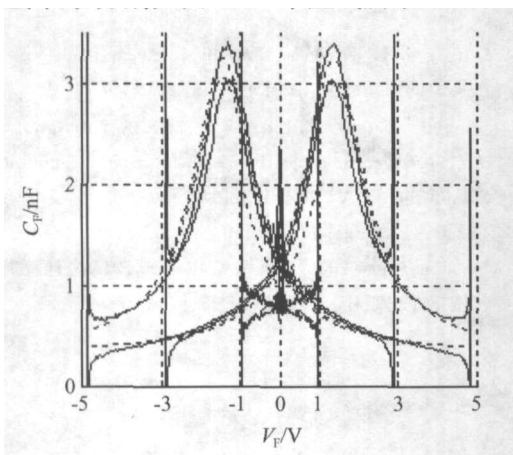


图 5 仿真和实验测试的  $C-V$  曲线

Fig. 5 Simulated and measured  $C-V$  curves

由图 5 可知,在电压  $V$  为较大的值时,随着电压绝对值的增大,仿真的电容值明显在减小,与实验结果吻合(图 5 中,在电压为  $\pm 1, \pm 3$  和  $\pm 5V$  时,电容为很大的值,是由于测量误差的影响,根据(37)式

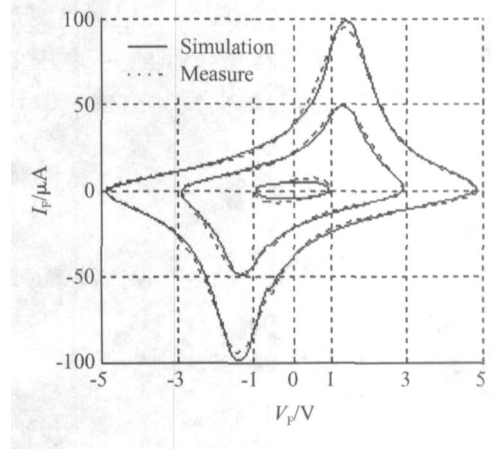


图 6 仿真和实验测试的  $I-V$  曲线

Fig. 6 Simulated and measured  $I-V$  curves

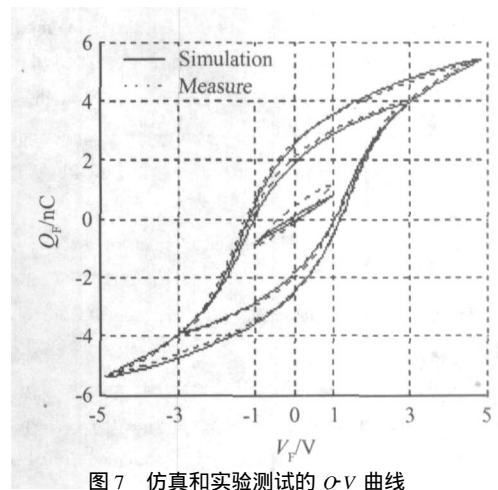


图 7 仿真和实验测试的  $Q-V$  曲线

Fig. 7 Simulated and measured  $Q-V$  curves

的微分计算所致,实际的电容值应该为电压趋于  $\pm 1, \pm 3$  和  $\pm 5V$  时的实验测试的电容值).

根据铁电电容模型参数可知其矫顽电压为 1.4V.由图 5~7 可知,在激励幅度大于矫顽电压(激励电压幅度为 3,5V)时,根据模型仿真的结果和实验结果基本吻合;在激励幅度小于矫顽电压时,根据模型仿真的结果与实验结果偏差较大.作为铁电存储器中的器件,铁电电容的工作电压大于矫顽电压,因此本文的模型可以描述应用铁电存储器中铁电电容的性能.

### 5 结束语

本文基于铁电体是电偶极子的集合,根据实验测试的铁电电容的  $C-V$  特性选定电偶极子矫顽电压的概率密度函数是  $t$  分布的前提下,推导出铁电

电容的  $C-V$ ,  $F-V$ ,  $Q-V$  关系式,且根据这些关系式仿真的结果与实验结果基本吻合(即使在电压增大到一定的幅度后,仿真的  $C-V$  曲线和测试的  $C-V$  曲线仍然基本吻合).

## 参考文献

- [ 1 ] Derbenwick G F, Isaacson A F. Ferroelectric memory: on the brink of breaking through. IEEE Circuits and Devices Magazine, 2001, 17(1): 20
- [ 2 ] Geppert L. The new indelible memories. IEEE Spectrum, 2003, 40(3): 48
- [ 3 ] 2001 ITRS Front End Process, November 29, 2001, Santa Clara, CA
- [ 4 ] Miller S L, Nasby R D, Schwank J R, et al. Device modeling of ferroelectric capacitors. J Appl Phys, 1990, 68(12): 6463
- [ 5 ] Miller S L, Schwank J R, Nasby R D, et al. Modeling ferroelectric capacitor switching with asymmetric nonperiodic input signals and arbitrary initial conditions. J Appl Phys, 1991, 70(5): 2849
- [ 6 ] Dunn D E. A ferroelectric capacitor macromodel and parameterization algorithm for SPICE simulation. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1994, 41(3): 360
- [ 7 ] Sheikholeslami A, Gulak P G. Transient modeling of ferroelectric capacitors for nonvolatile memories. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1996, 43(3): 450
- [ 8 ] Sheikholeslami A, Gulak P G. A survey of behavioral modeling of ferroelectric capacitors. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1997, 44(4): 917
- [ 9 ] <https://src.silvaco.com/ResourceCenter/en/SimulationStandard/showArticle.jsp.year=1997&article=a3&month=apr>
- [ 10 ] <https://src.silvaco.com/ResourceCenter/en/SimulationStandard/showArticle.jsp.year=2002&article=a3&month=apr>
- [ 11 ] Zorzi M, Speciale N, Masetti G. Automatic embedding of a ferroelectric capacitor inside the circuit simulator Eldo. Proceedings of the Fifth IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation 2001 (BMAS 2001), 2001: 97
- [ 12 ] Lim K, Kim K, Hong S, et al. A semi-empirical cad model of ferroelectric capacitor for circuit simulation. Integrated Ferroelectrics, 1997, 17: 97
- [ 13 ] Zheng Chen. Ferroelectric capacitor and 1T-1C/2T-2C simulation by SPICE(user's guide). Symetrix Corporation, 5055 Mark Dabbling Boulevard, Colorado Springs, CO80918, USA
- [ 14 ] Preisach F. Uber die magnetische Nachwirkung. Z Physik, 1935, 94: 277
- [ 15 ] Evans J T, Bullington J A. A ferroelectric capacitor simulation model. IEEE 7th International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 1990: 692
- [ 16 ] Bartic A T, Wouters D J, Maes H E, et al. Preisach model for the simulation of ferroelectric capacitors. J Appl Phys, 2001, 89(16): 3420
- [ 17 ] Farag N, Kliem H. Computer-aided modeling of dielectric and ferroelectric properties. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1999, 15(3): 25
- [ 18 ] Potter B G Jr, Tikare V, Tuttle B A. Monte Carlo simulation of ferroelectric domain structure and applied field response in two dimensions. J Appl Phys, 2000, 87(9): 4415
- [ 19 ] Le Grand de Mercey G, Kowarik O. Relaxation model for ferroelectric capacitors. ESSDERC, 2001
- [ 20 ] Gondro E, Kuhn C, Schule F, et al. Physics based fatigue compact model for ferroelectric capacitors. Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 2002, 2: 615
- [ 21 ] Cima L, Laboure E. A model of ferroelectric behavior based on a complete switching density. J Appl Phys, 2004, 95(5): 2654
- [ 22 ] Charap S H, Ktena A. Vector Preisach modeling. J Appl Phys, 1993, 73(10): 5818
- [ 23 ] Jiang Bo, Zurcher P, Jones R E, et al. Computationally efficient ferroelectric capacitor model for circuit simulation. 1997 Symposium on VLSI Technology, 1997: 141
- [ 24 ] Casella G, Berger R L. Statistical inference. Beijing: China Machine Press, 2002 [Casella G, Berger R L. 统计推断, 北京: 机械工业出版社, 2002]

## A New Model of Ferroelectric Capacitor Based on $C-V$ , $I-V$ , $Q-V$ Characteristics \*

Chen Xiaoming and Tang Ting 'ao

(State Key Laboratory of ASIC & System, Department of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract :** A new model is developed for describing the electrical behavior of ferroelectric capacitors. By modeling the ferroelectric capacitor as a switching capacitor (dipole capacitor) in series with a non-switching capacitor (linear capacitor) and this dipole capacitor as a collection of dipoles with a top electrode and a bottom electrode, and by assuming the probability density functions of dipoles' coercive voltages (positive and negative) as  $t$ -distribution according to experiment results of ferroelectric capacitors'  $C-V$  characteristic, the  $C-V$ ,  $I-V$ , and  $Q-V$  expressions of ferroelectric capacitors are derived, and these expressions are described with only six parameters. The simulated results from these expressions are quite fitted with experiment results.

**Key words :** ferroelectric capacitor; model,  $C-V$  characteristic; dipole; probability density function

**EEACC :** 0240Z; 2860F

**Article ID :** 0253-4177(2005)05-0983-07

---

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China Application Materials AM Foundation, National Defence Pre-Research Foundation of China, and PDC Foundation

Received 31 May 2004, revised manuscript received 11 September 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics