

薄膜物理及其应用讲座

第七讲 铁电薄膜神经元器件¹⁾

陆 昉 王 迅

(复旦大学李政道物理学综合实验室, 上海 200433)

摘要 在分析大脑神经元细胞的工作原理基础上, 得出了在人工神经网络中的神经元器件应具有的特点, 并介绍了硅基铁电薄膜神经元器件的模型及原理. 该器件利用铁电薄膜具有随外加脉冲电压而改变的自极化状态, 来调制半导体表面的电阻, 以达到不同状态输出的目的.

关键词 神经网络, 神经元器件, 铁电薄膜

Abstract From an analysis of the principle of the neural cell in the brain, the required properties of neural devices in artificial neural networks ferroelectric silicon film is proposed and its principle is discussed. The surface conductivity of the semiconductor can be changed by applying a voltage pulse which switches the equivalent polarization charge of the ferroelectric film, so that different output states can be obtained.

Key words neural network, neural devices, ferroelectric film

人工神经网络是 80 年代以来异军突起的一门新兴学科^[1]. 对它的研究已引起了生物、医学、数学、物理、及计算机等各学科的研究人员的极大兴趣. 它是根据迄今为止人们所掌握的生物神经系统的基本原理, 结合现代的高科技电子技术及其他物理手段并运用现有的数学分析工具, 来解决现代计算机较难解决的一些信息处理、模式识别及智能控制等问题^[2-4]. 目前神经网络理论的发展非常迅速, 它的研究和应用已经渗透到众多领域. 但要使它走出实验室, 关键还在于硬件的实现, 而现在对其硬件的研究还远落后于对其理论与模型的研究. 这在某种程度上也抑制了神经网络研究工作进一步开展. 因此, 积极开展对神经网络的硬件研究工作是十分必要. 本文将对硅基铁电薄膜的神经元器件的研制进行探索, 首先对神经网络作一个简单介绍, 以便能对神经元器件的特点有一定的了解, 然后给出铁电薄膜神经元器件的模型及其工作原理.

1 神经网络简介

人工神经网络是依据人脑神经网络的一些基本特点而建立的, 它通过模拟人的神经网络对信息的处理过程, 使该网络能象人一样, 通过强化训练来储存各种信息, 通过联想来认识事物, 并具有自我学习及处理问题的能力. 就人脑神经网络本身而言, 它大约包含有 10^{12} 个神经元细胞, 每个神经元大约与 10^2-10^4 个其他神经元相连接, 形成极为错综复杂的神经网络. 类似地, 人工神经网络也是由大量的神经元器件经过一定的互连所构成. 要了解神经元器件的功能及作用, 首先需要了解大脑神经元细胞的功能及作用^[5].

1.1 人脑神经元细胞

从解剖学角度来看, 每个神经元细胞并不

1) 1994 年 6 月 13 日收到初稿, 1994 年 9 月 25 日收到修改稿.

复杂,图1为神经元细胞结构的示意图。由图可以看出,神经元是由胞体、树突和轴突构成。胞体是神经元的代谢中心,在其周围一般生长有许多树状突起,称为树突。它们是神经元的主要接受器即神经元的输入。在胞体中还延伸出一条管状纤维组织称为轴突,它与其他神经元的树突相连接,其作用主要是传导信息,即神经元的输出。胞体的内外部都充满液体,中间有细胞膜分隔,在内液与外液中含有各种金属离子如钠离子 Na^+ , Cl^- 等。当细胞在刺激下发生兴奋时,细胞膜对 Na^+ 通透性增加,使 Na^+ 从膜外扩散到膜内,胞体内电位迅速上升,当刺激达到一定的强度后,就能使细胞产生扩展性的动作电位并传递给下一个神经元。根据刺激神经元的不同的树突,可使神经元处于兴奋状态和抑制状态。当刺激那些使神经元抑制的树突时,则使 Cl^- 的通透性显著提高,使胞体内的电位下降并为负。一般一个神经细胞体上有着大量树突,有兴奋性的,也有抑制性的。神经元的状态也就取决于这些树突所产生的局部电流的总和。因此,单个神经元的结构并不复杂,所能完成的功能也很有限,但是当大量神经元通过互连形成一个非线性动态系统时,则将形成一个极为复杂和丰富的系统。

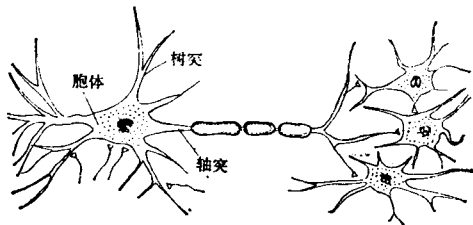


图1 大脑神经元细胞结构示意图

1.2 神经元器件的特点

根据人脑神经元细胞的功能,在人工神经网络中,神经元器件必须具备以下几个特点:

(1) 器件的状态应该是连续的,并且随外界触发的强度,时间的长短及次数的多少而变化,器件的状态也应具有方向性。显然用数字式的集成电路器件是很难做到这一点的。

(2) 器件的状态必须能保持,即具备存储

功能。器件的状态随外界触发信号(如电脉冲、光脉冲等)而变化,触发信号消失后,所变化的状态应该保留,并不随触发信号的消失而消失。

(3) 人工神经网络是由无数个神经元器件连接而成的。因此,该器件必须能便于大规模集成,同时也必须是低功耗的。

目前对神经元器件的硬件研制工作也在进行,并提出了几种实现方法,如用非线性模拟集成电路实现的点格神经网络 CCN^[6],也有用连续逻辑电路 DYL 来处理模拟和数字信号的神经元电路^[7],但能同时满足以上这些特点并最有希望实现的神经元器件的是最近提出的由硅基铁电薄膜所构成的 MFS (Metal Ferroelectric Semiconductor) 器件^[8]。

2 铁电薄膜神经元器件

2.1 铁电薄膜材料

铁电薄膜材料是一种具有自发电极化,而且其极化矢量可以在外电场作用下反转的电介质材料。该材料内部的极化强度 P 及方向随外加电场 E 的变化关系如图2所示。当外加电场大于矫顽电场 E_c 时,材料内部的电极化方向将发生翻转并趋于饱和极化强度 P_s ,当外加电场去除后,铁电材料的电极化并不消失,而能保持很长时间。

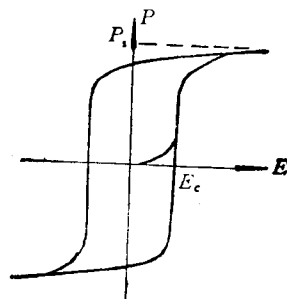


图2 铁电薄膜的极化强度随电场的变化

铁电薄膜材料在外电场作用下,电极化状态从一个方向转换至另一个方向需要一定的时间,该时间的长短与所加的外加电场强度有关,可表示为^[9]

$$\tau_s = \tau_{s0} \exp(E_a/E), \quad (1)$$

式中 E_a 为激活电场。当外加电场固定时，铁电薄膜材料中的极化强度随时间 t 的变化可表示为^[10]

$$P(t) = P_s \{1 - 2 \exp[-(t/\tau_s)^m]\}, \quad (2)$$

对于薄膜材料 $m = 2.5$ 。

2.2 铁电薄膜神经元器件的模型

铁电薄膜神经元器件是由半导体材料、铁电薄膜与金属层所构成，如图 3 所示，其结构与常规的 MOS 器件完全类似，只是将 MOS 结构中的氧化层用铁电薄膜来取代，因此可将其称之为 MFS 器件。在 MFS 器件结构中，铁电薄膜层中的极化电荷将在半导体表面产生感应电荷并使半导体表面的能带发生弯曲。根据极化强度及方向，可在半导体表面产生积累、耗

尽或反型状态，如图 4(a,b,c) 所示。当半导体表面处于积累与耗尽状态时，在源极 S 与漏极 D 之间加上一个电压，也不可能有电流通过，因为在这之间存在一个反向 pn 结；而在表面处于反型状态时，源漏之间就有沟道电流通过。因此沟道电流 I_{DS} 的大小与铁电薄膜中的极化状态及强度有密切的关系，如图 4(d) 所示。

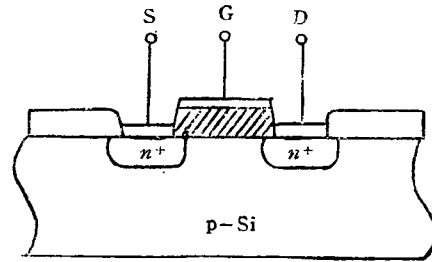


图 3 铁电薄膜神经元器件的模型图

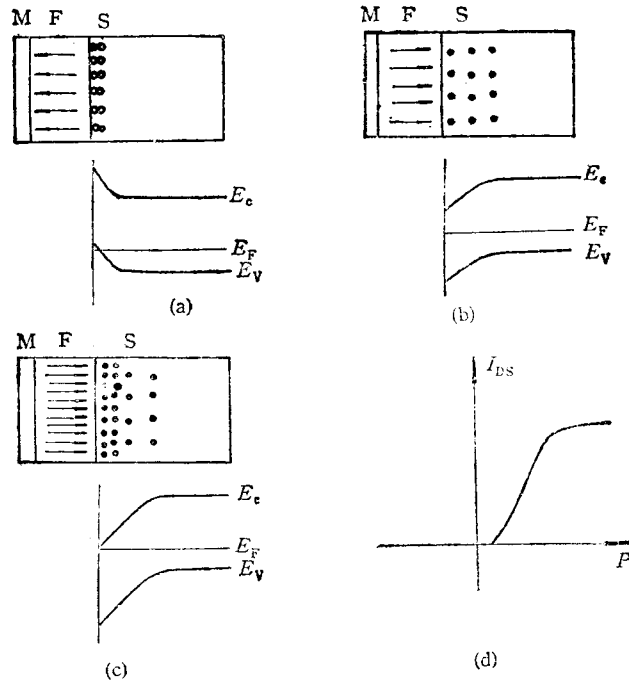


图 4 半导体表面状态随铁电薄膜极化强度及方向的变化

(a) 表面积累；(b) 表面耗尽；(c) 表面反型；(d) 沟道电流 I_{DS} 随铁电薄膜极化状态的变化关系

如果在栅极上施加脉冲电压，则铁电薄膜中的极化状态就会在外加电场作用下发生变化。假设铁电薄膜中的初始极化强度为 $-P_s$ ，它在半导体表面感应出正电荷，沟道电流 I_{DS} 趋于 0。当在栅极上施加正脉冲电压后，铁电

薄膜中的极化强度就会逐渐由 $-P_s$ 状态向 P 状态转化，半导体表面的正电荷将不断减少，负电荷将不断增加，如图 5 所示。由于在脉冲间隔期间，铁电薄膜中的极化强度并不会发生变化，因此其极化强度仅取决于脉冲幅度 V_P 、脉

冲宽度 t_p 及脉冲的个数。由(2)式可知, n 个脉冲后,其极化强度可示表为

$$P(n t_p) = P_s \{1 - 2 \exp[-(n t_p / t_s)^m]\}, \quad (3)$$

式中 t_s 也就与加在铁电薄膜上的电场强度即薄膜厚度及脉冲电压的幅度有关。

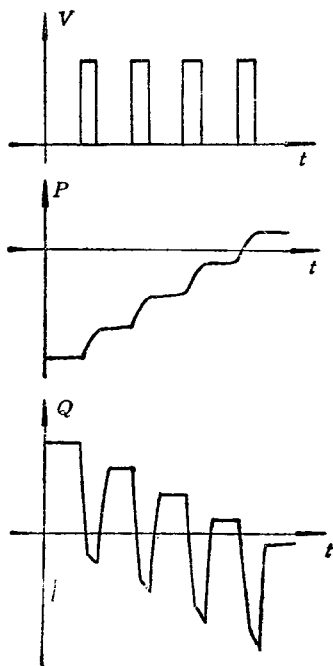


图5 铁电薄膜极化强度 P 和半导体表面电荷 Q 随脉冲电压的变化

显然对于 MFS 器件,它具有以下几个特点:

(1) 铁电薄膜中的极化状态可以连续变化,它是由栅极上所加的脉冲电压的极性、脉冲电压的幅度、脉冲电压的宽度以及脉冲电压的个数所决定。而铁电薄膜中的极化状态不仅可以决定源漏之间是处于导通还是截止,而且还可以改变源漏之间阻抗的大小,若再配以一定的电路就可输出不同的电压脉冲。

(2) 栅极上的脉冲电压可改变铁电薄膜中的极化状态,而脉冲电压过后,该极化状态能长时间保留,因此具有很好的“记忆”效应及存储功能,而且保留该状态并不需要外加任何电流,因此该器件具有低功耗的特点。

由此可见, MFS 器件是十分适合于人工神经网络中的神经元器件,它具备了神经元器

件所必需的各种基本条件。

2.3 铁电薄膜神经元器件的集成

人工神经网络是由大量神经元经过一定的连接而形成的,因此需要该器件能具有高集成度。由于铁电薄膜的介电常数可高达 200—2000,其极化强度可大于 $20-30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$,因而该器件的面积可以做得很小,其集成度可显著提高。图 6 为 $m \times n$ 神经元器件集成阵列的示意图,其电路原理图如图 6(a) 所示。当在某一行金属条及某一系列 P 型衬底之间加上一个脉冲电压后就可改变该交点单元上铁电薄膜中的极化状态。而从某一系列的源漏极上就可得到这一列上 m 个神经元的综合状态,经过简单电路转换后就可形成相应的电脉冲输入到下一级的神经元。由于相邻两列神经元是由 pn 结隔离,因此当条状的宽度为 $1 \mu\text{m}$ 时,每个神经元器件仅占 $4 \times 2 \mu\text{m}^2$,与其他神经网络的硬件形式相比,这种结构所占的面积要小得多。

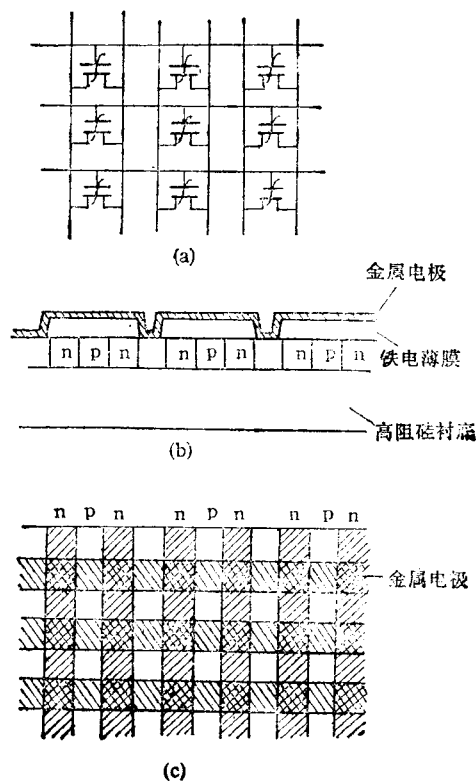


图6 $m \times n$ 神经元器件集成阵列示意图
a) 电原理图; (b) 剖面图; (c) 俯视图

3 铁电薄膜的制备

铁电薄膜的制备是 MFS 神经元器件的制备工艺过程中最主要也是最关键的工艺。所生长的铁电薄膜的电学性能必须满足一定的要求,其中包括工作电压必须与常规的集成电路兼容,要有良好的铁电性能及介电特性,较小的漏电流及高的击穿电压。此外,要有良好的界面特性,其中包括铁电薄膜与硅的界面以及铁电薄膜与金属的界面。

目前,铁电薄膜的制备技术正在得到飞速发展^[1],但仍还存在着许多问题有待进一步的研究,如铁电薄膜的疲劳老化,即随着铁电薄膜中极化方向转换次数的增加,残余极化将越来越小,显示出疲劳特性,目前能达到的最好疲劳特性为 10^{12} 次,离实际应用所需的 10^{15} 还有一定的距离。此外,铁电薄膜与硅衬底的界面特性对器件性能有很大影响,由于界面之间的材料不匹配而引起的界面应力,以及界面之间的离子及载流子在强电场作用下的互扩散都会对薄膜及器件的特性产生影响。这些都是当前所

需要研究解决的问题。

可以相信,随着这些薄膜材料及制备技术的日益完善,必将为神经元器件的大规模集成创造条件,从而将推动对神经网络及神经网络计算机的研究和发展。

参 考 文 献

- [1] 靳蕾等,神经网络与神经计算机,西南交通大学出版社,(1991).
- [2] 徐乘铮、张百灵,信号处理,8(1992),65.
- [3] 李劲、林刚、吴佑寿,通信学报,14(1993),84.
- [4] 田禾、戴汝为,计算机学报,5(1990),397.
- [5] 钟义信、潘新安、杨义先,智能理论与技术——人工智能与神经网络,人民邮电出版社,(1992),7.
- [6] T. Matsumoto, Leon O. Chua and H. Suzuki, *IEEE Transaction on Circuits and Systems*, 37 (1990).
- [7] T. Kitaura, S. Sato, K. Nakajima, et al., 1993 International Conference on Solid State Device and Material, Makuhari, (1993), 449.
- [8] Hiroshi Ishiwara, 1993 International Conference on Solid State Device and Material, Makuhari, (1993), 11.
- [9] J. F. Scott, L. Kammadiner, M. Parris et al., *J. Appl. Phys.*, 64(1988), 787.
- [10] 张自力,计算机学报, No. 1(1991), 77.
- [11] Gene H. Haertling *J. Vac. Sci. Technol. A*, 9 (1991), 414.

忆反法西斯战争时期的叶企孙¹⁾

虞 昊

(清华大学物理系,北京 100084)

反法西斯战争是 20 世纪的特大事,至今已胜利 50 周年,很值得纪念,让后人牢记并引以为鉴戒。中国人民的牺牲最大,更需从中总结。

各国物理学家对这一正义战争的胜利作出了巨大贡献,许多著名人物倍受赞佩,我国叶企孙就是其中之一。尤其是他曾深入“虎穴”给日本法西斯以直接打击,惜其传奇般事迹鲜为人知,且为此遭到冤案牵累,“文革”中更受严酷迫害含冤去世,但党和人民决不会忘记这位功臣,在纪念反法西斯战争胜利 50 周年之时,在他创建物理系、理学院并两度任校务委员会主任的

所在地——清华大学校园中已竖立起叶企孙铜像。1995 年 4 月 30 日(清华大学校庆),在与铜像揭幕的同时,举行了《一代师表叶企孙》一书的首发式,陈岱孙、赵忠尧、顾毓琇、任之恭、冯德培、钱临照、余瑞璜、王淦昌、施士元、郑一善、郭会邦、王竹溪、沈同、林凤、钱伟长、汪德熙、钱三强、王大珩、杨镇邦、葛庭燧、戴振铎、秦馨菱、胡宁、陈芳允、黄祖洽、周光召、席泽宗……等 50 余位老学者(内有 20 位是中国科

1) 1995 年 1 月 3 日收得。