

从电子管和晶体管的发展看纳米电子学

吴全德*

(北京大学纳米科学与技术研究中心 北京 100871)

摘要 真空电子管的发展遇到的主要困难是电子渡越时间,因而出现了 Barkhausen-kurz 振荡和电子群聚效应的微波管。按 Moore 定律,集成电路每 18 个月集成度提高一倍,十多年后元件尺度进入纳米级,原有理论不再适用。量子点和隧道结可能是纳米电子学的基础。

关键词 纳米电子学

1 真空电子管的发展

1.1 电子管与通信、广播事业

物质由原子组成。原子由带正电的原子核和周围的带负电的电子组成。有物质的地方都可以产生电子,供人们使用,但产生的难易大不相同。电子有自己的特性,它带有一个负电荷,有粒子性,也有波动性,并具有自旋特性等。它是在实验中的到的荷质比最大的粒子,很容易用电场使它加速,但要求在真空环境中使用。真空电子管的发明,为通信和广播事业等的发展提供可能。

一般认为,电子学的核心问题是:放大、振荡、逻辑运算,信息存储和读出;其它还有信息提取(如摄像)和显示(如彩电和计算机终端)。

电子管的出现也促使真空电子学和有关仪器技术的发展,影响比较深远的有:电子显微镜、场离子显微镜-原对控针、表面分析仪器等。

1.2 提高电子管工作频率的困难——电子渡越时间

由于通信、广播和军工的需要,人们总是希望提高电子管的工作频率,但遇到困难,原因在于电子从阴极到阳极的渡越时间。而克服困难的出路也在于利用电子渡越时间。在电子学的发展史上出现两种情况:

(1) Barkhausen-Kurz 振荡。1919 年 H. Barkhausen 和 K. Kurz 一反普通电子管的常规接法,将三极管的栅极接正电位,阳极接负电位,在栅-阳空间形成阻滞场,迫使电子返回,呈振荡运动,从而利用电子的渡越时间产生波长很短的电磁波。1933 年,我国学者孟昭英赴美国加

* 中国科学院院士

收稿日期:1998 年 9 月 15 日

州理工学院攻读博士学位,在 G. Potapenko 教授指导下,探索用这种器件产生极短波长电磁波的可能性。经过三年努力,他终于用他自己研制成的电子管产生了波长仅 1 厘米的连续振荡,创下了三极管产生微波连续振荡的一项世界纪录。

(2) 利用电子群聚效应的微波管。上面提到的利用三极管产生的振荡,它的功率很小。利用电子束在空间运动中的群聚现象和金属谐振腔,发展成一系列微波管,包括返波管、行波管和磁控管等。其中转换效率最高的磁控管已在民用微波炉中广泛使用。行波管在卫星通信和加速器等领域中至今仍在使用。

2 晶体管和集成电路的发展

1947 年 12 月美国贝尔实验室巴丁和布莱顿在半导体锗中发现微小的电流变化会引起输出功率的变化,称之为晶体管效应。他们于 1948 年获得晶体管发明专利。肖克莱对此现象进行了深入的理论研究。因此,巴丁、布拉顿和肖克莱分享了 1956 年度诺贝尔物理学奖。晶体管的出现,开创了半导体电子学,并从分立晶体管器件发展到集成电路和大规模集成电路。固体电子学也从半导体电子学进入微电子学,并极大地推动了社会的物质文明和精神文明。

目前大规模集成电路的元件,其尺寸大于固态器件电子自由程,电子输运行为具有统计平均性质。描述这些性质的特性主要是宏观物理量。大规模集成电路按 Moore 定律,每 18 个月集成度提高一倍。整个发展过程显示,由 40 年代厘米尺寸的真空电子管,到 50 年代毫米尺寸的晶体管,70 年代几十微米尺寸的大规模集成电路,90 年代微米尺寸元件的超大规格集成电路。按此速率,到 2011 年元件尺寸降到 80 纳米。此时宏观统计规律不再适用,载流子的波动特性及各种量子特性将起主导作用。集成度的提高与模具(包括掩模)尺度、光刻波长和材料(如光刻胶)本身等限制有关;集成度愈高,解决的技术难度也愈大,投资也愈多。趋近极限时,元件制作遇到的主要困难有:①微细导线制作有困难,改用电子束刻蚀也会有生产周期太长的问題;②绝缘层太薄,会发生电子隧穿;③每个元件的有效工作电压与电流产生的元件升温和散热问题。这些是技术方面的困难。从原理上看,新障碍出之于载流子的波动特性和各种效应。发展的出路应是利用这些特性和效应,就是要发展纳米电子器件和纳米电子学(也称纳电子学)。

3 纳米电子学及其基础

由于发明扫描隧道显微镜(STM)而获诺贝尔奖的 Rohrer 博士曾在给江泽民主席的信中讲到,过去重视微米技术的国家现今都已是发达国家,如今重视纳米科技的国家,将有希望成为先进国家。

近来,发达国家政府和大企业都将纳米技术列为重大支持对象。日本政府已启动了一系列雄心勃勃的研究计划,包括:量子波计划(1988—1993)、原子工艺计划(1989—1994)、电子波前计划(1989—1994)、量子功能器件工程(1991—2000)、原子/分子的终极操纵计划(1992—2001)、量子涨落计划(1993—1998)等,已取得一些突出成果。美国国家科学基金会、能源部、国家航空航天局、国防部都对纳米电子器件研究给予重点资助,IBM 和 AT&T 公司也有自己的

纳米电子器件发展规划。德国政府的研究与技术部详细调查了纳米科技的现状、应用前景以及各国的具体发展情况,出版了调查报告《纳米技术》,认为纳米科技是科学与产业的关键技术,须给予高度重视,其支持重点是纳米电子学及相关材料与技术。欧共体还实施了为期十年的单电子器件开发计划,主体设在法国国家实验室。国际纳米科技会议将纳米科技分为六个主要部分,即纳米电子学、纳米物理、纳米化学、纳米生物学、纳米机械学和纳米测量学。其中纳米电子学处于重要地位,因为它不仅有丰富的理论内容,而且有极为重要的应用前景。

微电子学的基础是 p-n 结。纳米电子学的基础是什么?有待实践解决。笔者认为:纳米点和隧道结。纳米点系指由 1—100 纳米的金属或半导体粒子,也称量子点或岛。由纳米点和隧道结组成的器件和阵列要解决三个课题:

(1) 量子隧穿效应。首先要考虑纳米点的材料和能级特性,还要考虑纳米隙的结构、绝缘材料和缺陷等。

(2) 载流子的相干性。在微电子器件中都不考虑载流子的相位作用,但在纳米电子器件中经弹性碰撞后,载流子的相位关系仍保留,因此载流子的振幅与相位都应考虑并加以利用。

(3) 多隧道结之间的牵连效应。在某纳米点输入(或取出)一个电荷时,多隧道结之间会产生牵连影响,这种影响应深入研究并加以利用。

纳米电子学要在载流子的粒子性和波动性都明显的情况下,研究放大、振荡、逻辑运算和存储会出现什么新现象和新规律,并利用这些规律制作纳米器件和系统。这是一个全新的领域,存在机遇与挑战。

4 纳米电子学基础研究从何着手

纳米电子学基础研究有两条路可走,一是沿着提高集成度的路,即“自上而下”的道路。这条道路国外投资很大。二是所谓“自下而上”的路,即将有机-无机材料尺寸逐渐增大,加工组装成纳米级器件,这条路,仪器设备的投资较少,先进国家也还在起步阶段。选择后者,比较符合我国国情。

我们认为可以从室温单电子原型器件着手,其理由有:①它是由隧道结构组成的简单器件;②它有放大作用,也可作单电荷存储器用;③它可用电荷探测器,例如有单电子三极管(国外叫做晶体管)的栅极上有 $e/2$ 电荷的改变,可产生纳安级输出电流的变化;也作电磁波探测器用。国外已有报导,但都在低温下工作。IBM 公司还曾展示过用碳纳米管制造的晶体管。

4.1 纳米器件的三个组成部分

(1) 纳米点。有两种办法制作比较方便,一种是用场蒸发办法制作,一般粒度在 10 纳米以上,制作容易,但一致性差,制作纳米点阵比较方便;另一种是用电化学方法,粒度大小容易控制,精度比较一致。我们已用 Au 和 CdS 等材料制作各种大小的纳米点。

(2) 纳米隙绝缘层。我们采用一层或多层有机分子,可以在导电基底、纳米点或 SPM 针尖上制作。制作时要注意尽量保持被制作表面的清洁。

(3) 纳米线。可采用场蒸发办法制作,也可考虑采用原子或有机分子操纵办法作少量纳米线样品。如何利用纳米碳管、纳米硅线或纳米 GaN 线作为纳米线亦应考虑。

4.2 实现单电子隧穿的要求

(1) 隧穿电阻 $R_T \gg$ 电阻量子 $R_K (=h/e^2 = 25.8k\Omega)$

(2) 纳米点荷电能 $E_C (=e^2/2C) \gg k_B T$

这里, C 是该纳米点的总电容, k_B 是 Boltzmann 常数, T 是该点的工作温度。如 C 不是太小, 只能在低温下观察到此现象。如要在室温下工作, C 应小于 1×10^{-18} 法拉。

(3) 纳米隙中材料的杂质和缺陷足够小, 否则影响隧穿几率。

4.3 观察单电子现象的实验装置和有关问题

观察单电子现象的最简单的实验装置可采用 STM, 在导电基片上制作一层有机分子膜, 再将带有机分子层的纳米粒子分散到基片上, 用 STM 探针寻找纳米粒, 并测 $I-V$ 曲线。此装置的纳米粒的电容很小, 容易在室温下和大气条件下观察到带量子台阶的 $I-V$ 曲线。这是一个纳米点和两个隧道结的纵向排列装置, 只能用来做些简单实验。北大纳米中心已取得一系列结果。为满足今后的集成要求, 所有隧道结都应该做在同一绝缘面上。举例来说, 在一个带绝缘层纳米粒子左右两边各做一个电极, 形成在一直线上的两个隧道结; 再在 90° 方向上做成第三个电极和隧道结。这样就构成平面型三极管。这就是最简单的可能有放大性能的横向器件。

在大气条件下研制纳米器存在表面吸附造成污染使性能差别很大, 不易重复。最好是在真空条件下研制此类器件。

当纳米点与隧道结总电容较大时, 在低温时容易观察到单电子效应。在研究降低隧道结电容的过程中, 如有一台从低温到高温可变的超高真空扫描隧道显微镜 (VT UHV STM), 对此项研究会大有帮助。

从平面器件到功能器件, 再到集成器件, 路要怎样走, 现在不可能说清楚。即使是国外已有报道的单电子器件也还需要化大力气去研究。这些都有待人们去探索, 去创新。

总之, 利用载流子的各种量子特性, 研究纳米 (1—100 纳米) 条件下, 放大、振荡、信息加工、存储等新现象和新规律, 以及采用什么新材料、新技术和新工艺, 来指导纳米器件和纳米集成阵列的设计和开发, 这就是崭新的纳米电子学。让我们鼓足勇气迎接它的到来, 为我国知识产权争一席之地。

参考文献

- 1 王频, 张志健, 吴全德. 纳米电子学研究的新进展及发展前景. 物理, 1998, 27(5): 273—277.
- 2 吴德馨. 深亚微米结构器件和介观物理. 中国科学技术文库(院士卷)卷 3, 北京: 科学技术文献出版社, 1998, 2914—2919.