

一种新的半导体材料和器件结构 :COS^{*}

阎志军^{1,2} 王 迅^{2,†}

(1 兰州大学物理系 兰州 730000)

(2 复旦大学应用表面物理国家重点实验室 上海 200433)

摘 要 国际半导体技术发展进程表预期器件的特征尺寸不久将减小到 $0.1\mu\text{m}$ 以下, SiO_2 作为 MOS 器件栅介质遇到不可克服的困难. 人们在寻找新的栅介质材料时, 提出了一种新的结构, 称为半导体上的晶态氧化物 (COS). 最近, COS 被用作 Si 衬底上生长 GaAs 的过渡层, 成为半导体材料和器件发展中一项新的突破. 文章对这一结构的进展情况做一简要介绍.

关键词 晶态氧化物, MOS 晶体管, 硅基集成, 新材料

CRYSTALLINE OXIDES ON SEMICONDUCTOR A NOVEL SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE STRUCTURE

YAN Zhi-Jun^{1,2} WANG Xun^{2,†}

(1 Department of Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(2 Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) predicts the more aggressive scaling rule that the feature size of Si chips will soon reach the $0.1\mu\text{m}$ scale. It will be impossible to use SiO_2 again as the gate dielectric in next generation devices because of the unacceptable large leakage current. In the search for new alternatives, a novel structure——COS (crystalline oxides on semiconductor) has been suggested. Recently, this COS structure was employed to serve as a buffer layer in the epitaxial growth of GaAs on Si substrate. This invention led to a breakthrough in the development of semiconductor materials and device technology. We present a brief review of the background and progress of COS technology.

Key words crystalline oxide, MOS transistor, Si-based integration, new materials

COS 是晶态氧化物 - 半导体 (crystalline oxide on semiconductor) 的简称. 这个名词的正式出现还是不久以前的事情. 2001 年 9 月初, 美国半导体工业巨头之一的 Motorola 公司宣布在芯片制造领域取得了重大突破: 他们成功地将 GaAs 外延生长在硅衬底上, 得到了直径为 12 英寸的硅基外延 GaAs 圆片. 这一突破有可能解决困扰半导体工业 30 多年的一个难题: 集成 III - V 族半导体高性能光电子器件同硅 CMOS 微电子电路在同一芯片上. Motorola 公司的这一发明, 很快被美国《纽约时报》和有有线电视网作了报道, 并成为国际上关注的一个热点. 2001 年 9 月 11—12 日, 美国材料学会在田纳西州召开了一个题为“半导体上晶态氧化物的介电科学和器件物理新功能 (Dielectric Science and New Functionality in Device Physics for Crystalline Oxides on Semiconductors) 的研讨会”^[1], 参加人员来自美国、德国、英国、日本、瑞

士、意大利、中国等约 50 人, 包括美国橡树岭国家实验室、宾州大学、耶鲁大学、Motorola 公司等. 尽管会议气氛因为“9·11”事件而受到影响, 但与会者对 COS 的兴趣并无减退. COS 结构是怎么提出来的? 它的意义、用途和前景怎样? 本文将对此作一简要介绍.

1 COS 结构的由来

硅微电子器件的核心是金属 - 氧化物 - 半导体 (MOS) 晶体管和 MOS 电容, 最主要的应用是微处理器和存储器. 长期以来, 作为 MOS 栅氧化物的介质一直是 SiO_2 . 随着微处理器和存储器等器件特征尺

* 2002 - 03 - 06 收到初稿, 2002 - 06 - 12 修回

† 通讯联系人, E-mail: xunwang@cableplus.com.cn

寸的不断减小,作为栅绝缘介质的 SiO₂ 的厚度也相应地不断减小.自 20 世纪 60 年代以来,半导体集成电路一直是按照摩尔的缩小率发展,即器件的集成度每 18 个月增加一倍.2001 年 11 月,美国半导体工业协会(SIA)公布了 2001 版的国际半导体技术进程表(International Technology Roadmap for Semiconductors——ITRS)^[2].新版本进程表相对于 1999 年版本又加快了微型化的进度,要求作为特征尺寸之一的等效氧化层厚度在 2005 年小于 1.3nm,2007 年小于 1.1nm.

氧化层厚度的不断减小,所带来的一个严重问题是漏电流的不可接受地增大.在 MOS 结构中, SiO₂ 的量子隧穿电流随着栅介质厚度的减小而指数增长:

$$I \propto \exp(-2\sqrt{2m^*}\phi t/h),$$

这里 m^* 是电子有效质量, ϕ 是 Si 和 SiO₂ 界面处的势垒高度, t 是 SiO₂ 介质层的厚度, $h = h/2\pi$, h 是普朗克常数.对于 3.5nm 厚的 SiO₂ 薄膜,当偏置电压为 1V 时, MOS 栅极漏电流是 $1 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$, 当栅氧化层厚度减小为 1.5nm 时,漏电流陡增到了 10 A/cm^2 , 即当栅氧化层厚度减小一倍时,漏电流增长了 12 个数量级.为了解决这个问题,人们开始寻找新一代栅极介质材料,这就是高介电常数(高 K) 材料.对介电常数比 SiO₂ 高的材料,要获得同样的栅极电容,它的厚度可以比 SiO₂ 大 K_h/K_0 倍,这里 K_h 和 K_0 分别是材料和 SiO₂ 的介电常数.这样厚度为 t_h 的材料对应的等效氧化层厚度为 $t_{eq} = (K_0/K_h)t_h$.这样,使用高 K 材料,可以用比较大的物理厚度来避免隧穿电流,而同时得到小的等效氧化层厚度.

高 K 材料大多是一些金属氧化物和金属硅酸盐,像 Ta₂O₅, TiO₂, ZrO₂, HfO₂, HfSiO₄, ZrSiO₄ 等,它们在 Si 上形成的一般是非晶态薄膜.非晶态薄膜与 Si 之间存在许多悬挂键,造成很高的界面态.后来,人们发现二元金属氧化物如 SrTiO₃ (STO) 这类材料可以在 Si 上生成单晶薄膜,于是, COS 结构开始受到人们注意.

Motorola 公司多年来从事 STO 在 Si 上的生长,目的是制造超薄栅晶体管.而他们在 COS 方面的贡献却源于实验中的失败.像别人一样,他们在 Si 上生长 STO 时加入氧,当 STO 晶体薄膜增厚时,氧会透过 STO 到达 Si 表面而生成一层玻璃状中间层. Motorola 的科学家和其他研究者一样,试图用各种办

法去消除这一中间层,但没有成功.后来他们发现,有了中间层以后,在 STO 中的原子间隔变大,可以让 GaAs 晶体以晶格匹配的方式在其上外延生长.科学家们意识到,他们的这一发现,有可能使半导体科学界和工业界期盼了三十多年的一个难题得到解决.现在, Motorola 公司已经用这一方法制造了世界上第一个 Si 上的 8 英寸 GaAs 外延片,并和另一家外延片生产厂合作制造出了 12 英寸的 Si 上 GaAs 外延片.这正是 COS 引起美国学术界关注和媒体竞相报道的原因.

2 COS 的材料和结构

COS 结构中的晶态氧化物大都是碱土金属和过渡金属的氧化物,可以是单层也可以是多层结构,通常表示为 (AO)_n(A'BO₃)_m, 这里 A, A' 表示 II A 族碱土金属原子,如 Ba, Sr, Ca 等; B 表示 IV B 族过渡金属原子,如 Ti, Zr 等;下标 n 和 m 分别表示 AO 原子平面和 A'BO₃ 单位晶胞的重复数目.作为 COS 结构的晶态氧化物,必须满足以下几个基本条件: (1) 晶态氧化物与硅衬底之间有良好的晶格匹配; (2) 氧化物和半导体衬底之间要有良好的化学稳定性和热稳定性; (3) 晶态氧化物要有很好的绝缘性能; (4) 希望氧化物有高的 K 值.其中第一和第二个条件最为重要,因为有许多氧化物尽管 K 值高,绝缘性能好,但不能生长为晶态,或稳定性不好,无法应用.

首先,晶态氧化物与硅衬底之间的晶格失配必须要小,这是实现外延生长的必要条件.晶格失配会导致界面处产生悬挂键,在电学特性上造成电位移,在界面处中断,影响 MOS 晶体管的特性.

按照常规的晶格匹配思路,只有很少的材料可以和硅衬底实现晶格匹配生长,而有广泛用途的 III - V 族半导体材料(如 GaAs, InP, GaN)和超导材料(如钇钡铜氧超导体)等,都是与硅不匹配的.但是有一种旋转晶胞生长方式,为外延生长晶态氧化物提供了可能,使简单立方、面心立方、钙钛矿及 NaCl 结构的材料可以在硅衬底上外延生长.这种方法已用于 SrTiO₃ 和 BaTiO₃ (BTO) 在 Si 上的外延生长.

Si 是金刚石结构,而 BTO 是钙钛矿型的四角晶体结构(四方结构),其晶格常数为 $a = b = 0.3992 \text{ nm}$, $c = 0.4036 \text{ nm}$. BTO 沿 c 轴生长时, a, b 与硅的晶格常数 0.357 nm 失配达到 26%. 室温下,当 BTO 原胞绕 S[001] 轴旋转 45°, 它的底面对角线长 0.56 nm , 与 S[001] 的晶胞边长只相差 3.9%, 二者之

间可以实现晶格匹配生长.如果在 BTO 和 Si 之间有一层 BaO,后者是具有晶格常数为 0.5520nm 的 NaCl 结构,那么 BTO/BaO/Si 结构的晶格失配更小.从这个例子可以看出,晶格匹配并不要求氧化物和衬底具有同样的晶体结构,只需要两种材料的某一个面具有相同的原子配置即可.STO 的晶体结构为简单立方,晶格常数 0.3905nm.采用旋转晶胞生长方式,当 STO 晶体原胞绕 $Si[001]$ 方向旋转 45° ,满足 $(001)_{STO}/(001)_{Si}$ 和 $[100]_{STO}/[110]_{Si}$,它与 $Si(001)$ 晶格失配大约为 1.7%,也可以实现晶格匹配.图 1 显示了 BTO 晶格在旋转 45° 后与下面 BaO 的匹配情况.BTO 和 STO 都是钙钛矿结构,这是一种重要的晶体结构,因为很多钙钛矿结构材料具有铁电属性,钇钡铜氧超导体也具有类似的结构.值得一提的是,由于 Si 和 Ge 可以以任何比例互溶成 SiGe 合金,其晶格常数可以在 0.543—0.565nm 之间连续变化.以它作为一个弹性平台,将有更多的氧化物在其上面外延生长.

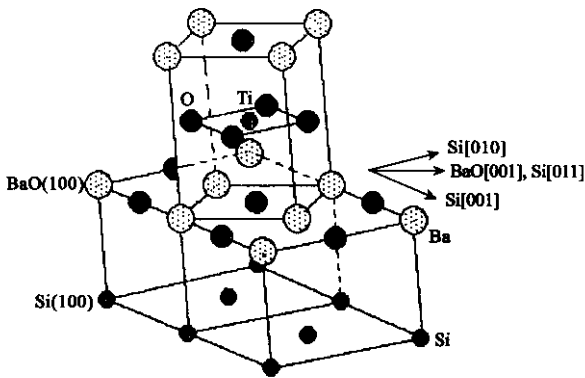


图 1 BaTiO₃ 在 Si(100) 面上的晶格匹配生长

其次,氧化物和半导体衬底之间要有良好的化学稳定性和热稳定性.这也是最初生长 COS 结构最难以克服的问题.

早期在 Si 衬底上外延生长氧化物时,外延层和硅衬底之间总是有一层非晶 SiO₂ 过渡界面,因为相对于整个外延层,它的厚度很薄,所以一直被忽略.当进一步减小氧化层厚度,发现这一层非晶 SiO₂ 阻止了后面晶态氧化物的外延生长.非晶 SiO₂ 多半是界面化学反应造成,这种化学不稳定性成为制造 COS 结构的一大障碍.另外,高温退火是半导体的常用工艺,在制造 COS 时也需要高温,这时氧化物中的氧可能向下渗透并与衬底反应,这也会导致非晶 SiO₂ 的形成,所以选择的氧化物还应当具有热稳定性.Hubbard 和 Schlom 从热力学角度考察了周期

表中所有元素氧化物的热稳定性,发现碱土金属氧化物在硅表面是稳定的,这成为选择碱土金属氧化物来生长 COS 结构的重要支持^[3].

最早实现 COS 生长的是美国橡树岭国家实验室的 McKee 等^[4],他们在制造 COS 结构时,采用了“逐层界面能最小化”的概念.理论证实,只有实现逐层界面能最小化才可能得到晶格匹配外延生长.他们采用五步生长法,具体过程是:先将 $Si(001)$ 表面暴露在 Sr 蒸气中,在覆盖度为 0.25 单层 Sr 时,表面形成 (4×2) 再构,它是高度完整并和 Si 衬底晶格匹配的,并且在室温和加热时非常稳定.X 射线光电子谱显示此时形成的不是简单的 Sr 原子在 Si 表面的吸附,而是 Sr 的硅化物,其中 Sr 原子替代了 Si 的顶层原子,并且留在界面处作为以后生长的 STO 的一部分.这样避免了对 Sr/Si 再构表面的氧化.然后引入氧,当形成完整的一层 SrO 之后,再生长一层 TiO₂,如此重复,形成 SrTiO₃ 结构.由于要确保形成一层完整的 SrO 之后才能形成另一层完整的 TiO₂,所以生长过程中不间断地用反射高能电子衍射进行监视,以保证逐层界面能最小化的实现.使用逐层生长方法得到的 STO 的晶体原胞相对于衬底 $Si(001)$ 旋转了 45° ,这样晶格失配从 28% 减小到 1.7%,从而保证了良好的界面特性.

图 2 展示了 McKee 等用同样方法制造的 BaTiO₃/Ge COS 结构截面图.图中氧原子并没有显示出来,但是 Ba, Ti 原子明显的对比和 Ge 原子的 $[110]$ 对称性可以很清楚地看到.从图中可以明显看出这种方法得到的界面具有原子级的平整度,这意味着良好的界面化学控制.同时,界面处原子的整齐配置意味着良好晶格匹配的实现.如果不使用逐层生长方式也可以得到外延生长的氧化物薄膜,但是在氧化物/半导体界面处则难以获得良好的晶格匹配.

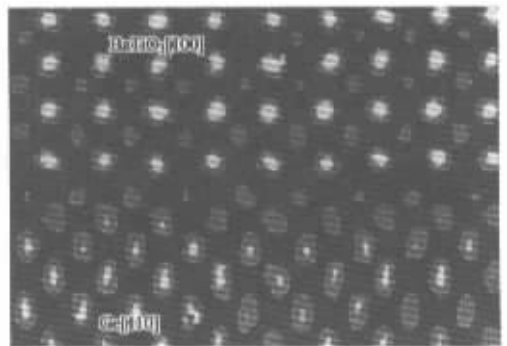


图 2 BaTiO₃ 在 Ge(110) 面的外延生长
(参见文献 7 1)

表 1 不同材料在 Si 衬底上的导带和价带偏移及相关物理特性

材料	晶体结构	晶格参数 /nm	电中性能级 /eV	带隙 /eV	导带偏移 /eV	价带偏移 /eV	介电常数
Si	金刚石	0.357	0.36	1.1	-	-	-
SiO ₂	非晶体	-	-	9.0	+3.1	+4.8	3.9
BaO	NaCl	0.5520	2.5	5.0	+1.26	+2.1	-
BaTiO ₃	钙钛矿	0.3992	-	3.4	-0.1	+2.3	1400
SrTiO ₃	钙钛矿	0.3905	2.6	3.3	-0.14	+2.3	300

Liang 等发现 STO 之所以能够在 Si 上外延生长,是因为在 Si 和 STO 之间形成了一种“模板”。在不同的 Sr 覆盖度下, Sr/Si(001) 可以形成 (3×2)(2×1)(5×1)(7×1)(8×1) 等多种再构,但是只有 Sr 覆盖度为 0.5 的 (2×1) 再构,在随后的暴露氧和高温退火过程中是稳定的^[5]。X 射线光电子能谱分析认为形成了硅酸锶。这一层均匀、稳定和二维的晶态硅酸锶起了“模板”的作用。模板在结构上与 Si 匹配,化学上在高温和富氧的气氛中稳定,从而能够避免生成非晶 SiO₂,实现从共价键的半导体到离子键的氧化物之间的平稳过渡。

3 COS 的物理特性

COS 作为器件的基本结构,人们最关心的就是它的电子特性和电学特性。

电子特性主要是 COS 的能带结构。如果把 COS 作为 MOS 的栅介质,则氧化物和衬底之间的能带排列是个重要问题,它要求氧化物的带隙大于衬底的带隙,它们之间需要比较大的正能带偏移,否则会导致场效应管不能关断和形成大的漏电流。SiO₂ 与 Si 之间的能带排列是非常理想的。SiO₂ 的禁带宽度是 9eV,它与 Si 之间的价带偏移和导带偏移都有 3—4eV,保证了界面处有足够高的电子和空穴势垒。Robertson 和 Chen 采用了电中性能级模型计算了一些高介电常数材料在硅衬底上的能带偏移^[6],发现众多高介电常数材料与 Si 接触的电子势垒都比较低。表 1 列出了一些材料的相关物理性质。

从表 1 可见,STO 与 Si 之间有较大的价带偏移,但导带偏移为负值。所以,STO 可以用在 p 沟道场效应管中,但是它不能用于 n 沟道场效应管中,因为负的导带偏移将导致场效应管不能被关断。与能带偏移相联系的是金属在 COS 上的肖特基势垒高度,Robertson 和 Chen 的计算表明,不同金属与很多氧化物的肖特基接触,电子势垒的高度都小于空穴势垒高度,COS 结构的漏电流多半来自于电子的肖特基发射。BaO 的电中性能级位于禁带中央,并且拥有合适的导带/价带偏移,在 BaTiO₃/Si COS 结构中,在 BaTiO₃ 和 Si 之间插入不同层数的 BaO 可以提高电子势垒高度。在 McKee 的试验中^[7],插入 6 层 BaO 的 COS 结构漏电流减小了 6 个数量级。这证实使用不同的氧化物序列可以调整 COS 的能带结构。

COS 替代 SiO₂ 作为 MOS 的绝缘介质层,它的主要电学特性就是电容—电压曲线。

图 3 是 Droopad 等测得的 COS 结构 C—V 曲线^[8]。氧化物是 11nm 厚的 STO 薄膜,电极为 TaN。由 C—V 曲线在电荷积累区的电容值得到其等效氧化层厚度为 0.8nm,电容率为 0.033pF/cm²,禁带中央的界面态密度为 6.4×10¹⁰/cm²·eV。在利用 COS 结构制造 FET 时,为了避免短沟道效应,在衬底和 STO 之间插入了一层 0.5—0.7nm 的低 K 界面层。图 4 是 n—MOS 和 p—MOS 晶体管的输出特性曲线,沟道长度为 1.2μm。在漏电压为 1V 时,它们的峰值跨导分别为 269 和 90μS/μm。电子和空穴的迁移率分别为 220 和 62cm²/V·s。漏电流比对应厚度的 SiO₂ 介质漏电流小 2 个数量级,达到了 15mA/cm²(n 型,偏压 0.7V)和 25mA/cm²(p 型,偏压 -1.4V)。根据漏电流与温度和电压的关系,得到的导带势垒高度为 0.71eV,比 STO 直接生长在 Si 上时的大。McKee 等制备的以 STO/Si COS 为基础的晶体管表现出了良好的高场表面迁移率,得到的结果是所有 SiO₂ 绝缘介质替代物中最高的^[7]。对于硅衬底上的 n 沟道 MOS 晶体管样品,最高电子迁移率为 321cm²/V·s,可匹敌于 SiO₂ 场效应管得到的结果,对于 15nm 厚度的样品其等效氧化物厚度小于 1nm。对于 BaTiO₃/Ge COS 结构,界面态密度甚至小于 10¹⁰/cm²·eV,相比之下后者拥有更好的界面。

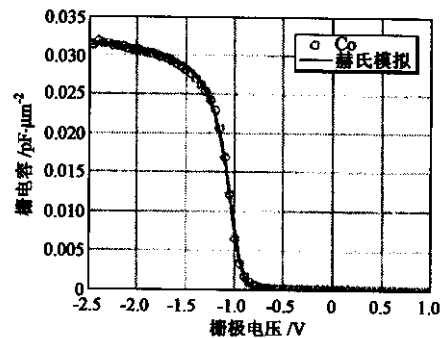


图 3 11nm SrTiO₃ 薄膜的 C—V 特性
(测量频率:100kHz)
(R. Droopad 摩托罗拉物理实验室)

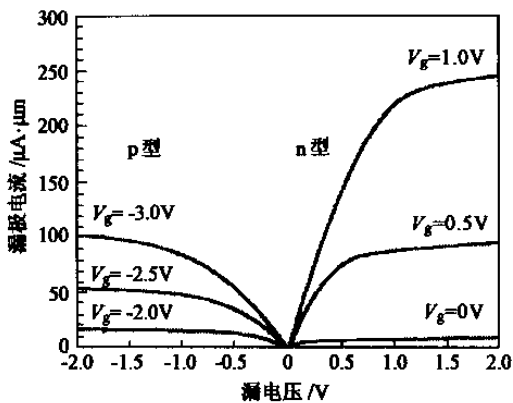


图4 以 SrTiO₃ 为栅介质的场效应管的输出特性曲线
(R. Droopad 摩托罗拉物理实验室)

4 应用与展望

COS 的应用目前主要有两个方面：

一是用于 MOS 结构中替代 SiO₂ 作为绝缘栅。

在 MOS 结构中, 尝试过很多种材料作为 SiO₂ 的替代物, 如氮化物、氧化物/氮化物堆叠结构等。但是在等效氧化层厚度小于 1.3nm 以后, 漏电流特性、稳定性、载流子迁移率都下降, 影响了器件性能的进一步提升。Al₂O₃ 虽然在与硅接触时有良好的热稳定性并且有很大的带隙(8.7eV), 但是介电常数太小(8—10), 难以得到小的等效氧化层厚度。高 K 的氧化物如 Ta₂O₅(介电常数 26) 是作为 SiO₂ 替代物的另一种常被考虑的材料, 但是它有很大的弛豫电流, 这通常被认为是 Ta₂O₅ 中靠近导带处存在的缺陷能带造成的, 并且 Ta₂O₅ 与硅衬底有严重的界面反应形成约 2.0nm 的 SiO₂ 层。作为栅介质替代物, 多元合金也被仔细研究, 这是出于综合非晶高 K 材料和低 K 材料的稳定性考虑的, 例如控制向 SiO₂ 中掺入不同量的 Zr 或者 Hf, 可以得到更好的材料特性。多元合金在平衡热稳定性和介电属性方面有良好的表现, 但是要得到 1.0nm 以下的等效氧化层厚度仍然是非常困难的。现在看来, COS 是解决 1nm 厚度以下等效氧化层的最有希望的途径。Droopad 等制造了 COS 结构的场效应管, 采用 STO 作为栅介质。当 STO 的厚度为 11nm 时, 根据 CV 测试得到的等效氧化层厚度仅为 0.8nm。

COS 的第二个应用是作为 Si 上外延生长 GaAs 和其他材料的过渡层。

GaAs 材料由于其脆性, 没有办法得到 6 英寸以上的商用晶片。人们研究 Si 上外延 GaAs 来获得大直径晶片已经有 30 多年。GaAs 的晶格常数为

0.5653nm, 它与 Si 之间的晶格失配为 3.9%。虽然利用应变层异质外延的方法可以实现 GaAs 在 Si 上的薄膜生长, 但是受到临界厚度的限制, 外延层厚度不能很厚。另外, 由于生长时形成反相畴的问题, 要在大面积内制造 Si 上的 GaAs 外延片是很困难的。利用 COS 在 Si 上外延 GaAs 是 Motorola 公司的首创, 选用的氧化物是 SrTiO₃(STO)。目前, Motorola 生长的单晶 GaAs 外延片厚 2μm, 位错密度小于 10⁵/cm², 迁移率达到体材料值的 95%, 是相当不错的。他们宣布在 12 英寸硅衬底上生长出 GaAs 外延片, 对半导体工业的发展会有很大影响。因为 (1) 它可以使 GaAs 外延片的成本大大降低, 性能大大提高 (Si 片的机械强度和热导率都比 GaAs 的高) (2) 使 GaAs 器件的制造成本大大降低 (3) 可比较容易地将高性能的 GaAs 光电子器件与成熟的 Si 集成技术相结合, 实现低成本的光电子集成 (4) 可以将现有的 Si 生产设备用到 GaAs 器件上, 延长了现有 Si 生产设备的使用寿命, 保护了现有投资。所以, Motorola 的首席技术长官 Dennis Roberson 称: “这是半导体制造历史上一个具有纪念意义的转变”, “我们打开了一扇通向崭新领域的大门”。这一突破为微芯片速度大幅度提升奠定了坚实基础。芯片设计者可以设计出新的集成芯片, 它具有硅材料的廉价、坚固性和高性能半导体的光发射与吸收能力, 这些能力被广泛用于光通信系统。复合功能芯片的出现, 使雷达系统、功率放大器和光学元件例如激光器系统有机会利用硅工艺减小器件尺寸的技术来降低成本。对消费者来说, 将得到更便宜但更智能化的电子产品, 它们具有更好的性能和新奇的功能。同时这一技术也将加速新应用的发展, 例如宽带光纤入户、移动电话的流式视频技术、自动防撞系统等。目前, Motorola 公司在这一技术上已拥有 270 项专利。他们用 Si 上外延的 GaAs 制造的功率放大器已经用于手机通话, 发光器件也已做成。Motorola 的下一步目标是利用 COS 在 Si 上生长 InP, 以实现芯片的时钟频率达到 70GHz 以上和制造长波长激光器。

事实上, 把 COS 结构作为缓冲层不仅限于 III - V 族材料, 很多优良的铁电材料、超导材料都有望与硅集成。最近, 已有几个组致力于用 STO 或 BTO 作为模板在 Si 上外延生长 Pb(Zr, Ti)O₃ 铁电薄膜^[9, 10]。很多铁电材料都具有钙钛矿结构, 但是 Pb 基钙钛矿不如 SiO₂ 稳定, 直接在 Si 上生长 Pb(Zr, Ti)O₃ 会有前面所说的界面非晶 SiO₂ 的问题。而用 SrTiO₃ 作模板, 这个问题得以避免。铁电材料在 Si 上

的集成对动态随机存储器和非挥发内存应用有着重要意义,而且在铁电电容器中使用氧化物电极可以明显改善铁电材料的疲劳特性. COS 不仅可以实现非挥发内存的硅集成,而且可以预计对其性能将有很大改善,因为影响信息保存时间的重要原因是界面俘获电荷,并且以场效应管形式作为内存元是最简单的构造,而且可以实现信息的非破坏性读出. 铁电氧化物中的很多材料又具有很大的压电系数,可望用于传感器和驱动器件. Lin 等在硅衬底上使用 COS 结构生长出了单晶压电薄膜,在纳米尺度上显示出了良好的一致响应特性,这对于微电机应用有着重要意义. 氧化物的居里点各向异性同它下面的半导体电荷态的耦合也会导致新的铁磁特性.

总的来说, COS 作为一种新的材料和器件结构,对它的研究还刚刚起步,许多问题需要进一步深入研究和了解清楚. 当前主要的研究都集中于以 Ba-

TiO₃, SrTiO₃ 为上层氧化物的 COS 制造及相应研究,有更多的材料有待于开发,其制造方法及物理特性需要去探索. 相信随着更多的科研工作者投入到这项工作中来, COS 将为我们带来更多令人欣喜的改变.

参 考 文 献

- [1] <http://www.mrs.org/meetings/workshops/2001/cos/>
- [2] http://www.semichips.org/downloads/itrs_slides.pdf
- [3] Hubbard K J, Schlom D J. J. Mater. Res. ,1996 ,11 2757
- [4] McKee R A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1998 81 3014
- [5] Liang Y ,Gan S ,Engelhard M. Appl. Phys. Lett. 2001 79 3591
- [6] Robertson J ,Chen C W. Appl. Phys. Lett. ,1999 74 1168
- [7] McKee R A, Walker F J ,Chisholm M F. Science 2001 293 468
- [8] Droopad R *et al.* J. Crystal Growth 2001 227—228 936
- [9] Lin A *et al.* Appl. Phys. Lett. 2001 78 2034
- [10] Wang Y *et al.* Appl. Phys. Lett. 2002 80 97

· 物理新闻 ·

木星的条纹来自何处？ (How Jupiter Got Its Stripes)

以色列 Bengurion 大学以 B. Galperin 教授为首的科学家们正在对围绕着旋转球体的大气湍流进行研究,他们的目的是解释为什么在木星、土星以及一些巨大行星上存在着引人注目的条纹现象. 一般认为地球表面湍流的产生是由于太阳所提供的热能和地球表面大气环流中的摩擦导致的能量耗散所造成. 而在稀薄的大气层中,气流内部的能量耗散比较小,因此部分太阳能将逐渐地聚集成一股稳定的整体的气流,它们将约束云层的分布,从而形成行星外部的条纹结构.

长期来科学家们一直认为行星的旋转运动与大尺度湍流间的相互作用控制着行星外部云层的环流. 现在 B. Galperin 教授的研究组再进一步提出了一个数学模型来描述行星的旋转运动与二维大气湍流间的耦合. 他们主要是用方程来反映能量在不同尺度的运动中的分布以及行星大气环流的能量特征,他们的计算表明行星的大气层内可存在大尺度的结构.

另一方面,他们的研究也有助于解释一些过去不能理解的观察结果. 如为什么在离太阳较远的行星处存在着很强的大气流? 以及一直认为,一个行星离太阳愈远,从太阳处获得的能量就愈少,因此它不可能有较强的大气流. 但 B. Galperin 教授的研究组在定量计算的基础上发现,离太阳远的行星确实从太阳处获得的能量比较少,但它的能量耗散也要比那些较暖和的行星小很多,因此它可以更多地保持着它所获得的能量,这就是为什么离太阳最远的海王星具有最强的大气环流的原因.

(云中客 摘自 Phys. Rev. Lett. ,16 September 2002)