

宏电子学与非晶硅器件

廖显伯

宏电子学 (Macroelectronics) 是电子学领域里正在兴起的一门学科, 它的内涵, 目前主要是指以非晶硅及其合金薄膜材料为基础的大面积集成化电子器件和光电子器件。这里所谓大面积, 是相对于微电子学 (Microelectronics) 研究的主要对象——晶体硅集成电路芯片而言的。前者的面积往往可达数平方分米, 而后者一般只有若干平方毫米, 至多达平方厘米量级。

微电子学在促进人类 20 世纪文明的过程中起过非常重要的作用, 无疑今后也还将发挥积极的影响。然而, 微电子学的精髓在于小型化。它的优势主要是在信号或数据的处理、加工方面, 而在信号或数据的接收、采集和输出、显示方面, 往往须面对相对庞大的客体。它们的面积, 由于这样或那样的原因是不能缩小的。这时, 我们就需要有大面积的电子器件或光电子器件, 以便使采集信号的对象或输出显示的屏幕与微电子学器件相衔接。这便是近年来大面积非晶硅器件与宏电子学得以发展的理由。

一、非晶硅材料的特性

这里所说的非晶硅, 是采用辉光放电 (GD) 分解硅烷 (SiH_4) 的方法在较低的衬底温度下 ($T_s \leq 300^\circ\text{C}$) 淀积的。这种制备方法亦称等离子增强化学汽相淀积法 (PECVD)。在这样制备的非晶态或无定形态的硅薄膜中, 包含着大量的氢原子 ($\sim 10\text{at.}\%$), 它实际上是一种硅氢合金材料, 常记为 $a\text{-Si:H}$ 。这种材料主要有以下特点:

1. 带隙态密度低

由缺陷和杂质在能带隙中引起的局域态密度对半导体材料的性质有决定性的影响。只有当带隙态密度很低时, 半导体材料才能对人为的微量掺杂或外加光、电场的作用产生灵敏的响应, 从而具有器件应用价值。

同一般非晶态半导体材料 (包括不含氢的非晶硅) 相比较, $a\text{-Si:H}$ 材料的带隙态密度是很低的 ($\sim 10^{13}/\text{cm}^3$)。这是因为非晶硅的带隙态密度主要起源于无定形结构所产生的 Si-Si 弱键和断键 (悬键); 而在 $a\text{-Si:H}$ 网络中键合了大量的氢原子后, 无定形结构的随意性增大了, 这就减少了材料薄膜的内应力, 相应减少了产生 Si-Si 弱键和悬键的几率。

$a\text{-Si:H}$ 材料带隙态密度低的特点, 是在 70 年代初期用场效应实验和光电导实验观察到的。这些实验结果, 同时也显示 $a\text{-Si:H}$ 在薄膜场效应器件和光敏器件方面的应用的潜力。在此基础上, 1975 年又在 $a\text{-Si:H}$

中实现了替位式的 p 型和 n 型掺杂, 预示着制备 $a\text{-Si:H}$ pn 结型器件的可能性。次年, 第一只 $a\text{-Si:H}$ pin 型太阳能电池问世, 揭开了这种材料器件应用的序幕。

2. 带隙宽度可调

$a\text{-Si:H}$ 材料的带隙宽度在常温下约为 $1.6\text{--}1.8\text{ eV}$, 依赖于材料中 H 含量的多少。如果在反应气体 SiH_4 中加入锗烷 (GeH_4) 或含碳的源气体 (如 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等), 可以很方便地淀积出 $a\text{-SiGe}_x\text{:H}$ 或 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 合金材料, 其带隙宽度大约在 $1\text{--}3\text{ eV}$ 之间。这一能量范围几乎覆盖了从近红外到整个可见光谱区。这对于 $a\text{-Si:H}$ 光生伏特器件、光敏色敏传感器以及发光器件等均具有重要的意义。

3. 光吸收系数大

在太阳光最强的光谱范围, $a\text{-Si:H}$ 对光的吸收系数比晶体硅大一个数量级以上。晶体硅对光的吸收系数之所以比较小, 是因为晶体硅是间接带隙材料, 其光跃迁过程受 K -选择定则的限制。然而, K -选择定则是依赖于晶体中原子排列的周期性或长程有序性的, 一旦原子排列的周期性消失了, K -选择定则也就不再成立。这正是 $a\text{-Si:H}$ 中发生的情况。所以, $a\text{-Si:H}$ 在 $0.8\text{--}0.4\mu\text{m}$ 波长范围的光吸收系数大, 具有很强的光敏性。在制备光生伏特器件时, $a\text{-Si:H}$ 材料只需要约 $0.5\text{--}1\mu\text{m}$ 就能充分吸收太阳光, 而采用晶体硅则往往需要 $100\mu\text{m}$ 以上。这样不仅大大节约了原材料的消耗, 可以制备真正薄膜化的光生伏特器件, 而且使得 $a\text{-Si:H}$ 这样低迁移率低寿命的材料也可制备出高效率的太阳能电池。

4. 工艺的灵活性大

低温 PECVD 制备 $a\text{-Si:H}$ 工艺具有很大的灵活性, 首先 $a\text{-Si:H}$ 薄膜对衬底的材料、面积和形状没有特定的要求。 $a\text{-Si:H}$ 可以在绝缘体 (如玻璃、陶瓷等) 到金属 (如不锈钢、钼等) 的多种衬底上淀积。而且, 衬底材料可以是刚性的块状结构, 也可以是柔性的带状体。衬底的面积实际上主要受反应室大小的限制。目前最宽的反应室已达 3.5 米, 用以在浮法玻璃上淀积高反射涂层 (厚约 $350 \pm 5 \text{ \AA}$)。

同时, $a\text{-Si:H}$ 薄膜容易通过光刻技术或激光刻蚀技术加工成形, 或构成集成化器件。也可以通过多次低温淀积把不同功能的 $a\text{-Si:H}$ 器件集成在一起, 或与晶体 IC 电路构成立体化集成电路。

二、器件应用

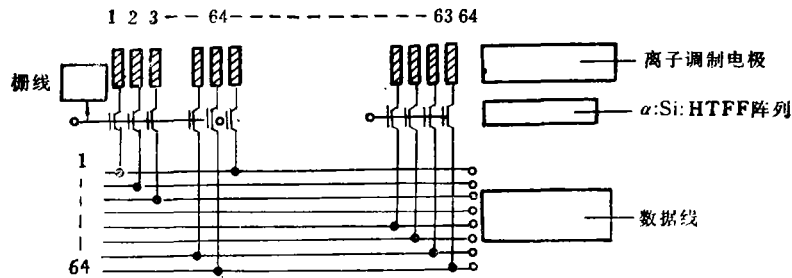


图1 离子成像线型打印阵列

a -Si:H 器件及其应用产品种类繁多,近几年发展十分迅速,已形成了一门新兴的宏电子学工业。据不完全统计,1988年 a -Si:H 器件产品的营业额已近十亿美元。

1 光伏伏特器件

a -Si:H 光伏伏特器件可用于光的探测和光电能量转换,在后一种情况下即是太阳能电池。 a -Si:H 太阳能电池一般具有 pin 型结构,因为这种材料的光生载流子迁移率低、寿命短,必须依靠在本征 (i) 层中建立的漂移电场收集光生载流子。

a -Si:H 太阳能电池当前发展的趋势,一是通过与窄带隙材料如 a -SiGe_x:H 和 CuInSe₂ 合金构成迭层电池,以进一步提高电池的效率和改善电池的稳定性。据报道 a -Si:H 与 a -SiGe_x:H 构成的迭层电池其能量转换效率已达到13—15%; a -Si:H 与 CuInSe₂ 合金材料构成的迭层电池也很有希望,其能量转换效率已达到15%。同时, a -Si:H 迭层电池的稳定性也大为改善,经长期(一年)室外光照后,迭层电池的退化率已可控制在10%左右。二是发展新型电池结构,以扩大 a -Si:H 电池的应用范围。例如,日本富士公司发展了一种集成型透孔接触 (THC) a -Si:H 太阳能电池,兼备采光和发电双重功能,可用作高层建筑或汽车上的窗玻璃。三是建立大规模 (10—50MW_p/年) a -Si:H 太阳能电池生产线,以期 a -Si:H 太阳能电站发电成本在90年代初期降至12美分/度,2000年降至6美分/度。从而,使 a -Si:H 太阳能电站在经济上可以同传统发电方式相竞争。

2 电子器件

(1) a -Si:H TFT 及 LCD 有源矩阵

黑白或彩色液晶显示屏 (LCD) 可望取代真空显像管 (CRT) 而构成平面化的电视机或计算机显示屏。为此,需采用 a -Si:H 场效应薄膜晶体管 (FETFT 简称 TFT) 阵列或 a -Si:H 薄膜二极管对 (TFD) 阵列作为其有源寻址矩阵。

a -Si:H TFT 阵列可用作 LCD 有源矩阵,这是因为它具有关态电流很低 ($<10^{-12}$ A)、开关电流比大 (10^6 — 10^8)、开启电压 V_g 与外围集成电路相容等特点。

从工艺角度上讲,制造大面积 a -Si:H TFT 阵列的稳定性、大面积均匀性、重现性等问题事实上已基本解决。在西方市场上,已相继有3、4、5、6甚至14英寸的彩色液晶显示电视机出售,其生产厂家主要是东芝、夏普、日立等日本公司以及一些欧美公司 (IBM, Philips)。他们的近期目标是占领便携式电视机市场,同时也瞄准军用、航空用电子设备的显示系统。

(2) 高压 a -Si:H TFT 及打印系统

在离子成像打印系统中, a -Si:H 阵列将外电路信号施加到离子调制电极阵列上 (图1),控制着偏向电极的离子流的大小,获得了10页/分打印速度。

然而,在电子成像或高速离子成像打印系统中,需要对数百伏高压调制电路的电流加以控制。为此发展了 a -Si:H 高压 (HV) TFT。应用这种 a -Si:H HV TFT 已制了高质量的电子成像打印机和高速离子成像打印机,打印速度达30—60页/分。

(3) a -Si:H 高速 TFT 及逻辑电路

a -Si:H TFT 可用以构成移位寄存器、双稳多谐振荡器、NAND 门和 NOR 门等逻辑电路。主要问题是频响特性不好。 a -Si:H TFT 逻辑电路的频响特性由开态电流给电路电容的充电时间和载流子在源漏之间的渡越时间决定。对于 a -Si 这样低迁移率 ($\mu_e \approx 1\text{cm}^2/\text{v}\cdot\text{s}$) 的材料和常规 TFT 工艺所采取的10 μm 沟道长度,其频响特性的上限约为10MHz。

改善频响特性的主要渠道是缩短沟道和降低杂散电容,为此发展了自对准工艺和垂直沟道 TFT。前者使沟道缩短为 $\sim 5\mu\text{m}$, 后者的沟道长度实际上即是 a -Si:H 膜厚度,约为 $1\mu\text{m}$ 左右。

(4) a -Si:H 记忆器件

a -Si:H p⁺ni 记忆器件是一种电可编程程序不挥发记忆元件。无论在操作速度、操作电压、保留时间和稳定性方面都可以同相应的晶体 MNOS 或 FAMOS 器件相媲美。擦、写操作的电压脉冲 (10ns) 幅度低于10V,写操作 p⁺ 边加正电压。擦操作极性相反。其开态电阻约1k Ω ,关态电阻约1M Ω 。经两年多探测试验表明,器件稳定性很好,甚至到160 $^{\circ}\text{C}$ 也很少发生变化。最近还发现,用铬 (Cr) 作电极的器件是数字式的,而用钒 (V) 作电极的器件为模拟式记忆开关,具有

存取各种中间态的能力。

3 光电子器件

(1) $a\text{-Si:H}$ 图象传感器

光电导型或光生伏特型 $a\text{-Si:H}$ 图象传感器依用途的不同具有不同的结构。

文件输入器。自从 1984 年有样机问世以来, $a\text{-Si}$ 接触式线型图象传感器的性能不断改善。其分辨率由最初 8 线/mm 提高到 16 线/mm, 扫描时间已小于 1ms/线, 并集成 $a\text{-Si:H}$ TFT 阵列为寻址逻辑电路, 大大减少了输出端数。此外, 也发展了具有类似功能的 $a\text{-Si:H}$ CCD 器件。

光位敏探测器 (PSD)。光位敏探测器由 $a\text{-SiC}_x\text{:H/a-Si:H}$ pin 异质结构成。据报导, 120mm 线性 PSD 具有 $\pm 0.1\%$ 精度, 可用作汽车高度传感器以控制四轮驱动。两维 PSD 可用于签字识别器、画笔 (paint-brush) 系统和电视标题发送。据报道, 高质量的计算机光板 (130mm \times 100mm) 在市场上已有出售。若将大面积 PSD 与液晶显示相结合, 还可构成电

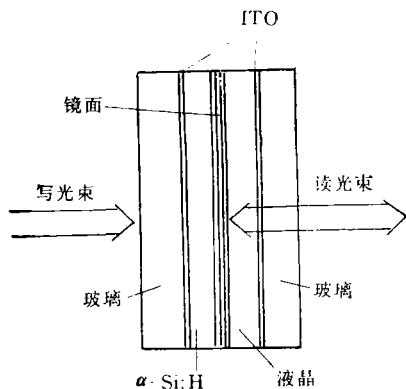


图 2 $a\text{-Si:H}$ 空间光调制器

话终端, 具有多种功能。它既可作为图象终端, 像传真机样发送数据; 也可以作为数据终端, 与计算机联机。

空间光调制器 (SLM)。 $a\text{-Si:H}$ 光电导型图象传感器与液晶相结合, 还可以构成高速空间光调制器 (图 2), 用以实现非相干光到相干光的转变、波长变换、光放大、逻辑功能等。据报道, 在欧洲市场上已有 4cm \times 4cm $a\text{-Si:H}$ SLM 出售, 其等效像素尺寸 26 μm \times 26 μm , 灵敏度 $\sim 150 \mu\text{W/cm}^2$, 分辨率 $\sim 40 \text{lp/mm}$ 。

(2) $a\text{-Si:H}$ 光感受器

光电导型 $a\text{-Si:H}$ 光感受器可用作高级复印机的感光鼓, 其灵敏度、化学稳定性、机械硬度和无毒性等方面都比传统的 CdS 鼓优越。通常 $a\text{-Si:H}$ 光感受器由三层组成: 阻挡层 (p^+ 或 n^+ $a\text{-Si:H}$), 光电导层 (本征或轻掺 B 的 $a\text{-Si:H}$) 和表面钝化层 ($a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 或 $a\text{-SiN}_x\text{:H}$)。为了在电晕放电过程中建立所需的表面电压 ($\sim 500\text{V}$), 光电导 $a\text{-Si:H}$ 层的厚度应

大于 20 μm 。为此, 发展了高速淀积 $a\text{-Si:H}$ 工艺, 或用 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 层取代 $a\text{-Si:H}$ 。

(3) $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 发光二极管 (LED)

$a\text{-SiC}_x\text{:H}$ 材料的带隙宽度, 随 C 含量的增加, 可从 1.7eV 增至 3.0eV 以上。这样, 电注入 $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ LED 在室温下可发射出红光到绿光。其发光效率依赖于载流子的注入效率, 目前已达 10Cd/m² (注入电流密度 100mA/cm²)。这样的亮度, 对于光显示还嫌不够。但它的制造工艺简单、面积大、成本低, 其潜在的优越性是很大的。目前的亮度可与 $a\text{-Si:H}$ 光敏器件相配合, 应用于新型光电子集成电路中。

(4) X-射线探测器

X-射线实时成像探测在医疗器械和工业上有着广泛的应用前景。 $a\text{-Si:H}$ pin 型 X-射线探测器有两种方案可供选择。一种方案是采用很厚的本征层, 直接对射线进行探测; 另一种更为有效的方案是借助于磷光体将 X-射线变成闪光加以探测, 这时 $a\text{-Si:H}$ 本征层的厚度可小于 1 μm 。常用的磷光体有 ZnS (Ni), CsI (掺 Th 或 Na) 和 CdWO₄ 等。

三、前景展望

从现在的发展势头看, 在 90 年代大面积 $a\text{-Si:H}$ 器件的产业化进程将会加速。

首先, $a\text{-Si:H}$ 太阳能电池, 将在 90 年代末期实现其发电成本可同传统发电方式相竞争的战略目标, 从而可望建立独立的或并网大型非晶硅太阳能电站。对缓和世界性的能源紧缺和减轻环境污染做出贡献。有人设想, 在 21 世纪初叶, 环球配置的 $a\text{-Si:H}$ 太阳能电站与超导输电线相结合, 将会以充足的电力源源不断地输往世界各个地区, 以满足全球的电力需要。为此所需配置的 $a\text{-Si:H}$ 太阳能电池板的总面积, 若按转换效率 10% 计算, 约为 807 \times 807 平方公里。这一面积, 即使再加 50% 绿化区, 也只占地球上沙漠地区面积的 4% 左右。这样的设想, 听起来有些像天方夜谭, 但并不是完全没有根据的。

同时, 以 $a\text{-Si:H}$ 为有源控制阵列, 或敏感元件阵列, 或两者兼而有之的办公用电器设备, 如平面液晶彩色显示或电视, 智能打印、复印设备, 传真机或电话终端等, 将会发展为营业额达数十亿乃至上百亿美元的规模宏大的高技术产业, 并进而逐渐渗透到家用电器之中。到 90 年代末, 便携式平面彩色电视也许将像今天的个人立体声装置那样随处可见。

尚待解决的问题之一, 是 $a\text{-Si:H}$ 器件的稳定性。从根本上说, 这是因为无定形材料具有亚稳态的结构, 而且大量进入无定形网络的氢原子具有较大的迁移性。所以, $a\text{-Si:H}$ 太阳能电池发生了光致退化, TFT 器件有阈值漂移问题等。好在这些年来的研究结果表明, 通过采取适当的措施, $a\text{-Si:H}$ 器件衰退的程度是可以控制在一定的范围之内而为实际应用所容许。