

非晶半导体薄膜与大面积电子学

陈 坤 基*

经过近 20 年的发展,非晶半导体的研究——特别是氢化非晶硅 ($a\text{-Si:H}$)——已成为当前凝聚态物理和固态电子学中最活跃的领域之一。这类新型的电子材料之所以能引起人们的极大兴趣和高度重视,是因为这类材料具有广阔的应用前景,而它的性质却还未得到理论上的解释;薄膜制备技术还需进一步改进、完善,器件的重要用途尚在研究与探索之中。

当今大家所熟悉的晶体管、集成电路以及由其作为有源元件制备的收音机、电视机、计算机等都是用晶态半导体 (C-Si) 和砷化镓 (C-GaAs) 等材料制成。然而非晶态半导体硅 ($a\text{-Si:H}$) 薄膜由于其优良的光电导特性和直接光能隙结构,以及可实现大面积淀积的优越性,为研制晶态半导体材料所不能实现的新一代电子器件提供了可能性。例如具有极高信息密度的光存贮盘,用于静电复印的光感受鼓膜,大面积廉价的太阳电池以及有源驱动大面积平板液晶显示屏等等。随着非晶态物理基础研究的不断深入,薄膜淀积技术的日益完善和新器件的不断出现, $a\text{-Si:H}$ 薄膜不但以其优异特性跻身于新电子材料之林,而且引起了固态电子学的新发展——大面积电子学或称非晶态微电子学的出现。

约在 70 年代中期,利用等离子体化学气相淀积 (PECVD) 法由硅烷 (SiH_4) 分解获得了 $a\text{-Si:H}$ 薄膜,它可以与 C-Si 材料一样,实现替代式掺杂,从而

人为地控制材料的导电类型和电导率的大小,继而奠定了设计和制备半导体器件基本单元 $p\text{-}n$ 结的基础。

在 $a\text{-Si:H}$ 薄膜大面积器件应用中,最早引人注目的是 $a\text{-Si:H}$ 太阳电池。这种基于 $p\text{-}n$ 结光伏效应把光能转换成电能的器件,如用常规的 C-Si 材料制作,则厚度约需 $0.25\text{--}0.35\text{mm}$ 。但由于 $a\text{-Si:H}$ 材料对可见光吸收系数大,使电池所需的有效最佳厚度仅为 $0.5\text{--}0.7\mu\text{m}$,即仅为 C-Si 材料厚度的 $1/500$ 。更值得注意的是 $a\text{-Si:H}$ 薄膜的获得不需要原始的硅材料,而可由气体源 SiH_4 直接分解淀积而成,这对今后建造大规模的太阳能发电站解决了材料上的需求问题。有人设计一座 1 平方公里面积的太阳能发电站,若选用 C-Si 片做有源材料,则需 480 吨。假设太阳光的能量密度为 $1\text{kW}/\text{m}^2$,电池转换效率为 20%,则该电站的发电量为 $2 \times 10^5\text{kW}$,而全世界年产硅单晶约 4000 吨,若全部用来制造电池,总发电量仅 $2 \times 10^4\text{kW}$,只相当于一座中等规模的水电站的发电量。这说明如不利用 $a\text{-Si:H}$ 薄膜作为太阳电池的有源材料,实现大规模太阳能发电是不可能的。

廉价是 $a\text{-Si:H}$ 太阳电池的又一优点。美国能源部已拟订出目标: 90 年代初为 12 美分/千瓦小时,到 21 世纪仅 6 美分/千瓦小时。最近美国已计划建立 10MW 和 50MW 的 $a\text{-Si:H}$ 太阳电池发电站。

提高转换效率始终是研究者追求的目的,据 1989

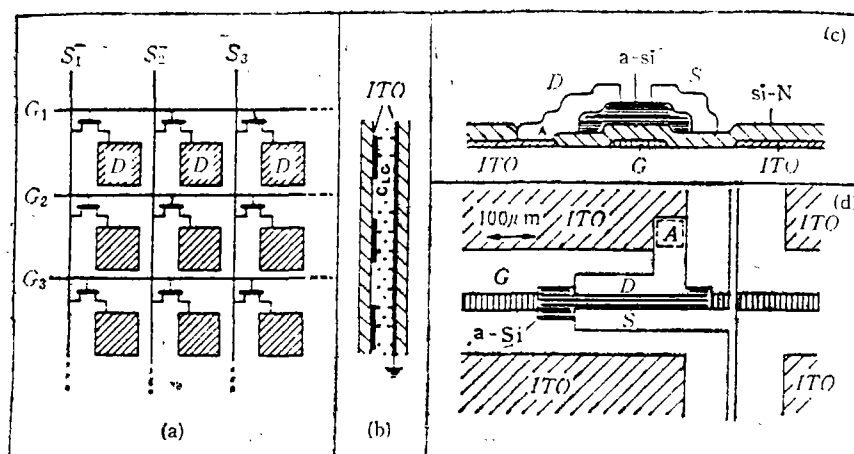


图 1 可选址的 $a\text{-Si:HTFT}$ 阵列有源驱动液晶显示板示意图

* 作者系南京大学物理系教授、“固态薄膜”国际顾问委员会委员。

年报导:单结的 $a\text{-Si:H}$ 电池已达到 12% (面积 1cm^2) 和 9% (面积 $100\text{--}1000\text{cm}^2$); 对多结结构最高可达 15%。当前该器件对大面积电子学提出的主要问题是: 如何保持多结结构中的 $a\text{-Si:H}$ 及其合金材料中的低缺陷态密度; 如何提高输出开路电压以及减少由于增大面积而引起的转换效率下降。

非晶态大面积电子学的另一个典型的例子, 是非晶硅薄膜晶体管阵列在大面积平板液晶显示中的应用, 这是当前显示技术的一大进展。新型微处理机的显示屏已不再采用传统的电子束管的显示器; 市场上已开始销售 4" 的便携式彩色平板电视机, 体积仅 $15 \times 10 \times 4\text{cm}^3$ 。这些新型的显示器都是由可选址的 $a\text{-Si:H}$ TFT (Thin Film Transistor) 阵列有源驱动液晶单元, 代替了传统的电子束显象管中的象素而完成图象显示功能。简单的原理如图 1a 所示, S_1, \dots, S_n 和 G_1, \dots, G_n 分别为 TFT 阵列的源电极母线和栅电极母线, 每个 TFT 的漏电极 D 与相应的方形透明导电膜 (ITO) 相接, 液晶体 (LC) 夹在该漏电极与另一块接地的蒸有 ITO 的玻璃板之间, 其横截面结构如图 1b 所示。在该结构中 LC 像一个等效的 $R_{LC}C_{LC}$ 负载串接在 TFT 的漏电极与地之间。当某一信号同时选通某一单元的 S 和 G 时, 则 S 上的信号电位通过 TFT 转移到 D 上, 使该单元的 LC 显示出信号成为一个象素。其中每个单元 TFT 的截面和版面结构如图 1c, d 所

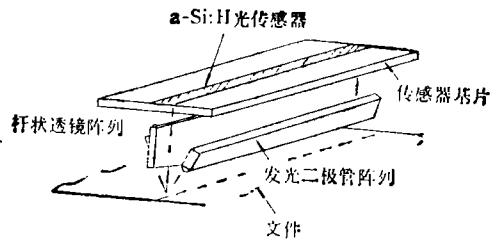


图 2 $a\text{-Si:H}$ 二极管阵列接触式线性图象传感器的部件分解图

示。据统计近年来全世界液晶显示屏的产量约每年 10^9 片, 应用的潜力十分巨大。但是技术上却十分困难。正如一位科学家所说: 有源矩阵显示的难度好比在玻璃衬底上制造一个百万位的随机存储器一样, 这相当于在 $25 \times 21\text{cm}^2$ 面积的 $a\text{-Si:H}$ 薄膜上制备 10^6 个 TFT, 与超大规模集成技术相比具有相同的集成度, 但有源区面积却要大 $10^2\text{--}10^3$ 倍。这无论是对淀积系统的均匀性和光刻的方法及设备; 还是对金属布线 and “容错” 技术都要引起一场革新。

由以上简单介绍可知, 建立在非晶半导体大面积淀积基础上的, 包括对其结构和基本物理性质研究; 对非晶薄膜材料制备方法、合金及界面性质研究以及对

其器件的微电子学应用研究在内的综合的固态电子学被称为大面积电子学或非晶态微电子学。

尽管当今 C-Si 器件在电子器件中占绝对重要的地位, 但随着非晶半导体技术的提高和各种新的非晶合金薄膜的合成, 以及其不受衬底材料限制和大面积淀积的优越性。非晶半导体薄膜器件正在悄悄崛起。在 1988 年仅 6 类 $a\text{-Si:H}$ 大面积器件的市售额已达 10 亿美元, 并已开始进入我们日常生活中。

1. 静电复印机对于一个优良的光接受器必须具备大的暗电导值、高的光电导特性, 非晶态硒 ($a\text{-Se}$) 薄膜正好具备这些特性而制成硒鼓复印机。然而 $a\text{-Si:H}$ 薄膜由于其 σ_{ph}/σ_d (σ_{ph} 为光电导, σ_d 为暗电导) 更大, 化学性质稳定, 机械强度高和热不敏感性等性质, 使制成的复印鼓具有更高的清晰度和反差, 且工作寿命高达一百万次。

2. 图象传真。早期的图象传真都采用 C-Si 电荷耦合器件 (CCD) 来实现光电信号间的转换。但要把一幅 $25 \times 21\text{cm}^2$ 大小的文件聚焦到很小的 CCD 元件上, 需要较长的光路聚焦装置, 十分困难和不便。而采用 $a\text{-Si:H}$ 二极管阵列作为图象传感器, 只要极简单的光学装置就可实现。图 2 是一个 $a\text{-Si:H}$ 接触式图象传感器的示意图。用一对发光二极管阵列作光源, 照射到文件上的光经反射后由一组杆状镜头聚焦到由 $a\text{-Si:H}$ 二极管阵列组成的光传感器上, 再由与其相连的扫描电路把接收的反射光信号转变成电信号。1984 年以来 Fuji-Xerox 公司已把分辨率为 8 line/min, 宽度为 25cm 的线性图象传感器用于市售的传真机。更有趣的是 0.9m 长的图象传感器已用于“白板”, 一改几百年来学生上课抄黑板笔记的传统方式, 在讲演的过程中就可得到写在“白板”上的讲演内容的复印稿。

3. 传统的医用 X 光探测器一般通过 X 光感光底片来记录, 医生不能实时观察和记录。而由 $a\text{-Si:H}$ pin 二极管组成的 X 光探测器不仅对由 MO 靶产生的 18keV 的 X 光具有足够高的灵敏度, 且能实现实时观察, 因此显示出巨大的市场潜力。更值得指出的是由于 $a\text{-Si:H}$ 薄膜对衬底材料选择灵活的特点, 则 $a\text{-Si:H}$ pin 光探测器可直接淀积在闪烁层上而大大提高其探测的灵敏度。

综上所述, $a\text{-Si:H}$ 薄膜大面积电子学的应用前景是十分令人鼓舞的。专家预言: 多功能的 PECVD 工艺将把 $a\text{-Si:H}$ 器件应用于 3 维集成; 随着大面积电子学的不断发展和成熟, 将能使现有的显示器、复印机、传真机以及打印机的性能进一步提高, 价格更加降低, 从而使这些办公室用的设备进入到普通家庭。更可喜的是今后高分辨的电视机也将用 $a\text{-Si:H}$ 薄膜元件。尽管我们不能说非晶大面积电子学将会取代传统的晶态电子学, 但专家们认为: 在下一个世纪它将成为与晶态电子学相平行的固态电子学中的新领域。