



低温多晶薄膜 晶体管研究

Polycrystalline Thin-film Transistor
by Low Temperature Process

金仲和



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

ISBN 7-04-010283-8



9 787040 102833 >

定价 7.90 元



W2



低温多晶薄膜 晶体管研究

Polycrystalline Thin-film Transistor
by Low Temperature Process

金仲和



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

作者简介



金仲和，1970年1月出生于浙江省嵊县（现为嵊州市），1991年7月、1994年3月、1998年6月分别在浙江大学信息与电子工程学系获得学士、硕士和博士学位。1994年获得硕士学位后留校任教并从事微机械技术研究工作，主要研究工作包括微机械加速度传感器、压力传感器、硅一体化谐振器等，在此期间提出微机械谐振器的倍频谐振机理。1996年3月至1998年2月赴香港科技大学访问，在此期间对实现低温薄膜晶体管的两种方法——多晶硅锗技术和金属诱导结晶技术进行了较为深入的研究，提出了统一的金属诱导非晶硅结晶机理，并在此机理的指导下研制成了超薄沟道多晶硅薄膜晶体管。现任浙江大学信息与电子工程系副教授，主要研究方向为硅微机械技术、微型传感器、微小卫星技术等。近年已发表主要学术论文近50篇，其中SCI收录的有十余篇。

导师简介



王跃林，1959年生于南昌，1982年在浙江大学信息与电子工程学系获学士学位，1985年在哈尔滨工业大学获硕士学位，1989年在清华大学电子工程系获博士学位，后回浙江大学任教，1991年任副教授，1993年晋升教授，1997年赴日本东北大学微机械研究室访问研究。1998年起任中国科学院上海冶金研究所研究员。近年来的主要研究成果包括硅一体化加速度传感器、大量程硅压力传感器、微机械陀螺、力平衡微压传感器等。现为国家重点基础研究发展规划《集成微光机电系统研究》项目首席科学家。主要研究方向为微机械技术、微光机电系统。

内 容 提 要

薄膜晶体管(简称 TFT)是一种重要的半导体器件,它是实现大屏幕液晶显示器的关键元件。本书根据作者在博士论文期间的研究工作整理而成,书中首先回顾了 TFT 的历史及发展现状,并论述了目前 TFT 研究中存在的难点以及可能的解决途径。随后对多晶锗硅薄膜晶体管和金属诱导横向结晶多晶硅薄膜晶体管进行了深入研究。文中利用大量实验数据和结果,着重研究了多晶薄膜的材料特性与器件性能的关系,指出了制约器件性能的关键因素,提出并实现了多种提高器件性能的方法。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 薄膜晶体管的应用	2
1.2 薄膜晶体管的分类	4
1.3 多晶薄膜晶体管的结构	6
1.4 多晶硅薄膜晶体管研究现状	7
1.4.1 非晶硅和多晶硅薄膜的淀积	7
1.4.2 非晶硅的固相结晶	9
1.4.3 脉冲激光快速退火	10
1.5 多晶锗硅薄膜晶体管研究现状	11
1.6 本书的主要内容	12
第 2 章 多晶锗硅薄膜的电特性	15
2.1 锗硅薄膜低压气相沉积系统简介	15
2.2 样品的制备	16
2.3 离子注入后的退火条件对电特性影响	18
2.4 离子注入前退火对电特性的影响	24
2.5 薄膜电特性与锗含量的关系	27
2.6 小结	30
第 3 章 锗硅薄膜晶体管的栅介质材料研究	32
3.1 用高频溅射氧化硅提高锗硅薄膜晶体管的性能	34

3.1.1	氧化硅/锗硅界面的材料分析	34
3.1.2	锗硅薄膜晶体管的制作	37
3.1.3	锗硅薄膜晶体管的电特性	39
3.2	等离子体辅助反应溅射 Al_2O_3	41
3.2.1	氧化铝的制备及材料分析	41
3.2.2	N沟道多晶锗硅薄膜晶体管的制作	43
3.2.3	晶体管的性能	44
3.3	小结	46
第4章	金属诱导非晶硅横向结晶	48
4.1	样品的制备	50
4.2	金属诱导横向结晶多晶硅薄膜的结构	51
4.2.1	镍覆盖区下非晶硅的结晶	51
4.2.2	镍覆盖区外的非晶硅结晶	52
4.2.3	横向结晶区晶粒的精细结构	55
4.3	金属诱导横向结晶多晶硅中杂质分布	57
4.3.1	镍覆盖区下杂质的分布与状态	58
4.3.2	镍覆盖区、横向结晶区、非晶硅区 的杂质含量	59
4.3.3	镍在横向结晶/非晶硅区的界面处的积聚	62
4.4	金属诱导横向结晶的速度及其制约因素	66
4.4.1	横向结晶长度、速度与退火时间的关系	66
4.4.2	横向结晶速度与退火温度的关系	68
4.4.3	横向结晶的方向性	68
4.4.4	横向结晶对镍原始图形的依赖性	71
4.4.5	镍覆盖区的存在对横向结晶的影响	73
4.4.6	非晶硅在长时间退火过程中的变化对横向 结晶的影响	76
4.4.7	横向结晶对各因素依赖性的解释	77
4.5	金属诱导结晶与横向结晶的机理	78

4.5.1	共溶金属诱导结晶的理论模型	79
4.5.2	硅化物金属诱导结晶理论	79
4.5.3	对 Hayzelden 理论模型的修正	80
4.5.4	Hayzelden 修正模型的局限性	82
4.5.5	金属诱导结晶和金属诱导横向结晶的 统一理论	83
4.6	小结	85
第 5 章	超薄沟道多晶硅薄膜晶体管	88
5.1	器件结构与制作	90
5.2	器件的电特性	93
5.2.1	金属诱导结晶薄膜晶体管的电特性	93
5.2.2	固相结晶多晶硅薄膜晶体管的电特性	97
5.3	器件特性与材料性质的关系	99
5.3.1	迁移率与薄膜结构的关系	100
5.3.2	漏电和材料结构及杂质含量的关系	100
5.4	小结	102
第 6 章	总结	104
6.1	锗硅薄膜晶体管	104
6.2	金属诱导横向结晶及超薄沟道多晶硅 薄膜晶体管	106
6.3	两种薄膜晶体管的应用前景	108
参考文献	109
致谢	133

第1章 绪 论

薄膜晶体管(thin film transistor, TFT)是一种重要的半导体器件,它被广泛应用在平板显示器¹⁻⁵、存储器⁶⁻¹⁰以及三维集成¹¹等各个领域。对薄膜晶体管的研究可追溯到60年代甚至更早¹²⁻¹⁴。1962年,P. K. Weimer¹⁵报导了在真空淀积CdS薄膜上制造的场效应晶体管。虽然在那时该器件的性能与稳定性都不好,但是它却带来了一种新的思想,即在半导体薄膜材料上制作晶体管,正是这一思想奠定了当代非硅材料衬底上大面积电子学的基础。1975年,Spear和Le Comber¹⁶在对氢化非晶硅(α -Si:H)的研究过程中发现,通过掺杂可在很大范围(高达8个数量级)调节氢化非晶硅的电导率。1977年,他们研制成功了非晶硅薄膜晶体管¹⁷,并提出它可作为开关用于有源寻址液晶显示器(active matrix LCD, AMLCD)中。

本章简要回顾薄膜晶体管的应用、分类与主要结构形式,讨论了目前多晶硅、多晶锗硅薄膜晶体管的研究现状,对研究中存在的主要问题进行了一定的分析,在此基础上引出本书的主要研究内容。

1.1 薄膜晶体管的应用

液晶是一种可通过外加电场控制其光学特性的材料,图 1.1 以扭曲液晶为例说明液晶显示器的基本工作原理。图中将偏振片、玻璃衬底之间的距离拉开了,以帮助理解。实际上,玻璃衬底间距仅为 $10\sim 15\ \mu\text{m}$,而偏振膜往往是直接贴在玻璃上的。图 1.2 示意了由薄膜晶体管为开关矩阵的有源寻址液晶显示器的工作原理,显示器的每一显示单元都由一个晶体管开关控制,从而大大提高了显示效果。与基于阴极射线管的显象管相比,AMLCD 具有功耗低,体积小,重量轻等优点,极有利于在便携式设备上的应用,因此它最先是在便携式计算机上得到了广泛的应用。在最近几年,由于制作成本的降低,AMLCD 的应用已开始从原来的笔记本计算机扩展到台式计算机、工作站、壁挂式电视、汽车、玩具等。其

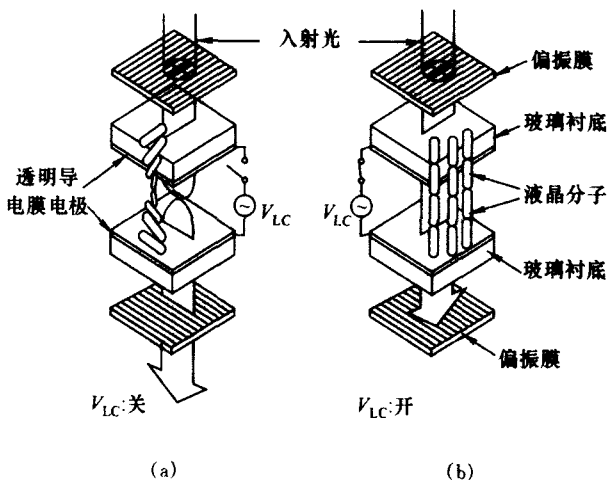


图 1.1 扭曲液晶显示单元的工作原理图

(a) 未加电压时,光可通过液晶盒 (b) 加适当电压时,光不能通过

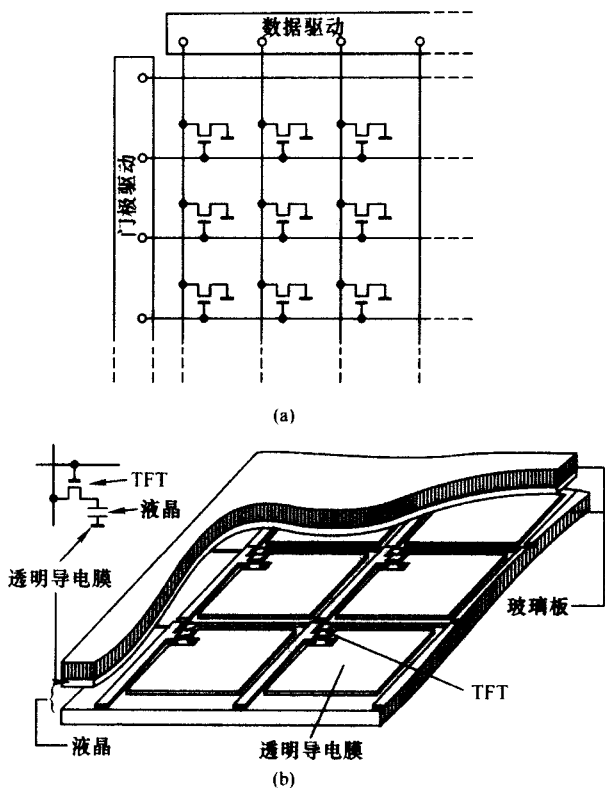


图 1.2 有源寻址液晶显示器示意图

(a) 电路原理图 (b) 结构示意图

实,大多数平板显示器都要求有源寻址,因此薄膜晶体管在显示器上的应用不仅仅限于 AMLCD,而应包括很多其他类型的平板显示器,如有源发光矩阵等¹⁸⁻¹⁹。就薄膜晶体管本身,其应用还可扩展到扫描仪²⁰、传感器²¹、喷墨打印头²²等领域。图 1.3 示意了其中比较典型的应用——X-射线成像仪²³⁻²⁴。这种成像仪以非晶硅 PIN 结为 X 射线敏感元件,以非晶硅薄膜晶体管为有源矩阵开关,从而实现了系统的集成。事实上,基于同样的原理与结构可制作

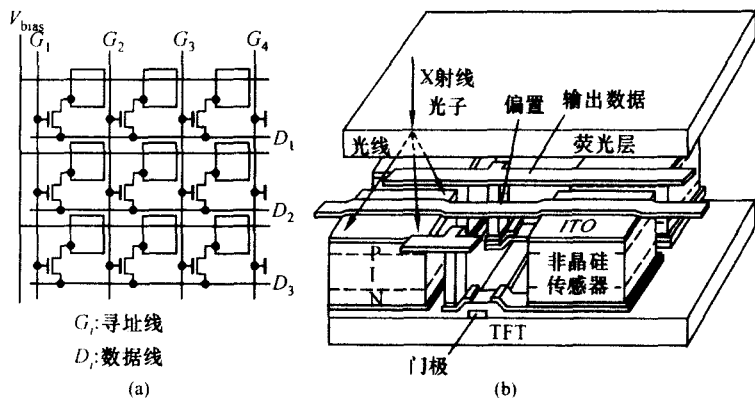


图 1.3 有源寻址 X-射线成像仪示意图

(a) 电路原理图 (b) 结构示意图

有源矩阵 CCD 用于光学成像²⁵⁻²⁶, 从而制作出数字化的照相机、摄像机。完全可以说, 薄膜晶体管的出现与发展使得人与人、人与自然之间的交流开辟了一种新的方式。

1.2 薄膜晶体管的分类

广义上说, 薄膜晶体管应包括所有制作在半导体薄膜上的晶体管, 如薄膜双晶体管, 在 SOI 上制作的各种晶体管, 等等。然而通常文献中提到的薄膜晶体管主要是指制作在绝缘衬底上的非晶或多晶半导体绝缘栅场效应晶体管。其基本工作原理与单晶半导体绝缘栅场效应晶体管是相同的。它们的区别主要在于所用的材料(非晶、多晶或单晶)、导电层(沟道层)厚度及导电机理。相对于单晶材料上的集成电路来说, 薄膜晶体管的主要特点是在一次工艺流程中能在大面积非硅材料衬底上, 如玻璃、有机材料²⁷⁻²⁹等, 制作出开关、电路等(因此有时被称为大面积电子学)。但由于非晶或多晶材料迁移率一般都比较低, 导致所得器件的响应速度

较慢,现在它主要被用于响应速度要求不高而需要在很大面积上制作的器件设备上,如显示器、扫描器等。如果能将薄膜晶体管的迁移率提高到一定的水平,则有可能用它来实现电路的三维集成。

到目前为止,人们已研究了很多不同材料制作的薄膜晶体管,如 InAs^{13} 、 CdS^{15} 、 $\text{CdSe}^{30\sim 32}$ 、 Te^{33} 、 InSb^{34} 、 PbTe^{34} 、 Se^{35} 、 Ge^{36} 、 SiC^{37} 、 C^{38} 、 $\text{SiGe}^{39\sim 40}$ 、 $\text{Si}^{1\sim 11,17\sim 29,41\sim 42}$ 等等。然而由于可靠性、稳定性以及工艺的复杂程度等原因,现在主要研究硅和锗硅材料。

薄膜晶体管就所用半导体材料的结晶学特性又可分为两大类:非晶薄膜晶体管与多晶薄膜晶体管。前者以非晶硅薄膜晶体管为代表,由于制作工艺简单、可大规模生产,而且制作工艺过程中无高温工艺从而可采用廉价的普通玻璃衬底,因此它的生产成本相对比较低,现已进入大规模生产阶段。目前市场上用于笔记本电脑的高性能平板显示器就是用非晶硅薄膜晶体管制作开关阵列的。然而,非晶硅材料的迁移率很低^{17,43~45},从而使得所得器件的响应速度受到严重限制,因此,这种器件一般只用作开关元件而难以制作对速度要求更高的控制电路。这就使得现在所用的平板显示器必须外加行与场扫描的驱动电路⁴⁶,使每一显示器的焊点数量达到数千个之多,同时,由于外加驱动电路使得成本难以下降,导致目前平板显示器价格远高于普通的显像管。

解决这一问题的出路之一是用迁移率较高的多晶材料替代非晶硅^{47~51}。一般来说,多晶硅的迁移率可比非晶硅高两个数量级以上,而多晶锗硅可以达到更高的迁移率^{39~40,52~56},用多晶硅或锗硅材料较容易实现 PMOS 与 NMOS 的集成,因此可用多晶硅或锗硅直接制作驱动电路。然而多晶薄膜晶体管的制作一般需要比非晶硅薄膜晶体管更高的工艺温度,而且多晶薄膜晶体管的关态电流一般比非晶硅薄膜晶体管大得多^{57~59},从而限制了它们在实际中的应用。

1.3 多晶薄膜晶体管的结构

多晶硅薄膜晶体管的基本结构主要有图 1.4 所示的四种。与其他结构如顶栅非共面结构⁶⁰、顶栅非自对准共面结构⁶¹及底栅共面结构⁶²相比,自对准共面结构具有工艺简单、电学特性好的特点,因此它在多晶硅薄膜晶体管的研究中的使用率是最高的。本文的研究也主要采用这种结构。由图可以看出,这种自对准共面结构晶体管主要由两层多晶材料及夹在它们之间的栅绝缘层(图中为二氧化硅)构成,这三层材料的制备也就自然成为器件制作工艺的关键所在。

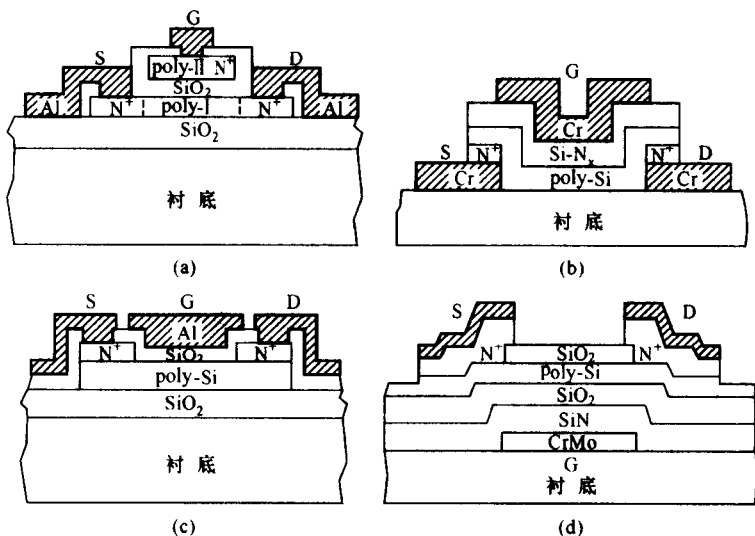


图 1.4 多晶硅薄膜晶体管常用结构示意图

(a) 自对准结构 (b) 顶栅非共面结构

(c) 顶栅非自对准共面结构 (d) 底栅非共面结构

下面将分别就多晶硅和多晶锗硅薄膜晶体管的研究现状作一

简单的回顾。

1.4 多晶硅薄膜晶体管研究现状

在多晶硅薄膜晶体管中,栅绝缘层材料一般采用二氧化硅。二氧化硅/硅材料的界面电学特性优越,制备二氧化硅的方法很多而且都是比较成熟的,例如低压气相化学沉积⁶³⁻⁷¹,等离子体辅助气相沉积⁷²⁻⁷⁸,电子回旋共振等离子体辅助气相沉积⁷⁹⁻⁸⁴,离子镀⁸⁵等等,制备所需的工艺温度也不高,完全能满足现在的应用要求,因此对多晶硅薄膜晶体管来说,栅氧化层问题不是很大,因而现在的研究主要集中在如何在低温下获取高质量的多晶硅薄膜上。

1.4.1 非晶硅和多晶硅薄膜的淀积

获取多晶硅最基本的方法有两种:低压气相化学沉积直接淀积多晶硅薄膜,或将淀积的非晶硅薄膜结晶成为多晶硅薄膜。图 1.5

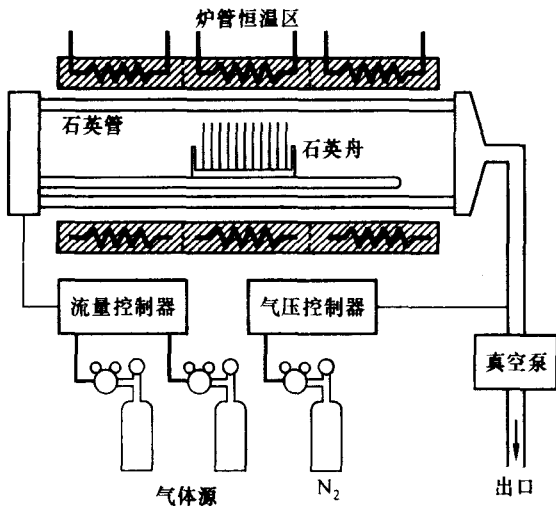


图 1.5 低压气相化学沉积系统示意图

示意了一种典型的壁热式 (hot wall) 低压气相化学沉积 (low pressure chemical vapor deposition, LPCVD) 设备,它主要由一个密封炉管、炉管外壁的加热电阻丝及保温装置、一个真空泵、及气体供应控制系统构成。这种反应炉的优点是均匀性好,使用方便,是半导体科研与生产中的常用设备。在以硅烷为反应气体的低压化学气相沉积过程中,根据工艺条件(主要是气压、温度)的不同,可分别获得非晶和多晶薄膜。Joubert⁸⁶ 等人曾对此作了比较系统的研究, Voutsas 和 Hatalis⁸⁷ 在后来对他们的研究做了补充,从而得到图 1.6 所示的关系。

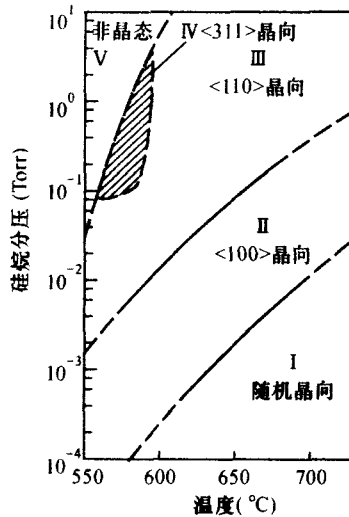


图 1.6 低压气相沉积所得硅薄膜的结晶学特性与温度、淀积时压力的关系

一般情况下,由低压气相沉积直接得到的多晶硅薄膜的晶粒尺寸在 100 nm 左右,所得到的多晶硅薄膜晶体管的场效应迁移率也在 $5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 左右⁸⁸⁻⁸⁹,远不能满足实际应用的需要。Meakin⁹⁰ 等发现晶粒尺寸和材料迁移率随淀积时的气压下降而增大,并和淀积的膜厚有一定的关系⁹¹⁻⁹²,然而遗憾的是在低气压下生长得到的薄膜表面很不平整,从而使得所得器件的迁移率⁹³与稳定性⁹⁴都不好。有研究表明,材料的结晶特性还与淀积速率有关,一般来说,淀积速率快可得到更好的多晶薄膜。在同样条件下,用乙硅烷作为反应气体比用硅烷作反应气体的淀积速率快得多,因此可得到更好的多晶薄膜⁹⁵。然而不管是采用硅烷还是乙硅烷,直接淀积多晶硅薄膜所需的工艺温度一般都要大于 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

也有一些报道称用适当的方法可将直接淀积多晶硅所需的温

度下降到 $400\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, 如热丝催化沉积⁹⁶、以硅烷和四氟化硅为反应气体的等离子体辅助气相沉积⁹⁷等, 报道称用前者可获得霍耳迁移率为 $130\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 的多晶硅薄膜, 而用后者可得到场效应迁移率达 $60\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 的多晶硅薄膜晶体管。如果这些方法在大面积上均匀性好、切实可行的话, 则不失为一种很好的选择。但到目前为止, 尚未有资料显示这些方法可望得到实用。

1.4.2 非晶硅的固相结晶

普通高温炉退火结晶是将非晶硅薄膜连同衬底一起放入一定温度的炉管中加热并保持一定的时间。在高温作用下, 非晶硅将逐渐转化为多晶硅。由这种方法得到的多晶硅薄膜的晶粒尺寸可达到 $1\text{ }\mu\text{m}$, 晶体管的迁移率可达 $20\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上⁹⁸⁻¹⁰³, 具体数值与非晶硅的沉积条件⁹⁹, 退火温度、时间¹⁰⁴, 薄膜厚度^{100,105}等都有一定的关系。并且可利用诸如大剂量硅离子自注入⁴²、用乙硅烷沉积非晶硅¹⁰⁶⁻¹⁰⁸等方法进一步提高晶粒尺寸与迁移率。然而这种方法一般需要 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高温, 并且退火时间比较长, 因此对衬底的耐温性能要求较高, 很难采用普通玻璃作为衬底材料。目前这种方法在用石英玻璃作衬底的小屏幕显示器中尚有应用。但是这种方法工艺简单, 技术成熟, 均匀性、重复性都很好, 并且与普通半导体工艺完全兼容, 如果能用适当的方法将多晶硅的结晶温度降到 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 就可以使用普通玻璃作为衬底材料, 从而能降低成本并在大屏幕显示器中得到应用。

一种比较有效的方法是在非晶硅表面或底面淀积金属薄膜, 如 Pd^{109} 、 $\text{Ni}^{110-112}$ 或 Au^{113} 等, 或直接淀积非晶硅-金属混合薄膜¹¹⁴、或将大剂量的金属元素用离子注入的方法掺入非晶硅薄膜中¹¹⁵⁻¹¹⁶, 这种薄膜在低于 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下就很容易结晶¹⁰⁹⁻¹¹⁶, 从而可采用廉价玻璃如 Corning7059 为衬底材料制作多晶硅薄膜晶体管。人们将这种方法称为金属诱导结晶 (metal induced crystallization, MIC)。G. Liu¹⁰⁹ 等人曾用这种方法在玻璃衬底上制作了多