

(5) 在 $\theta=\pi$ 附近形成的高级虹暗区的复光线的贡献;

(6) 与封闭或接近封闭的准周期轨道相联系的几何共振效应;

(7) 各种衰变(表面波的辐射衰变、在虹的焦散曲线的暗区的复光线的衰变和内反射的衰变等)之间的竞争等。

形成宝光的条件是:观察者前面一定要有云雾;观察者的身后必须有太阳光直接射来;观察者在阳光下的身影要正好落在云雾之中。

宝光是阳光沿切向入射到云雾前面的水滴上产生的后向散射光的干涉形成的,它的基本特征(如光环的角半径和光强度分布^[4,6],宝光的第一暗环通常是模糊的等)不同于虹和华,因此,经典的几何光学和一般的衍射理论均难以解释宝光现象。

迄今可以对宝光现象作出正确解释的理论有三个,即米氏理论,范氏的表面波理论和复角动量理论。米氏散射理论是解释宝光现象的理论基础;范德赫尔斯特的表面波理论是关于宝光的第一个有价值的理论;努森兹维格的复角动量理论既可给出米氏理论所揭示的宝光的全部特征,又揭示出宝光是多种物理机制综合作用的结果。

宝光的实验室模拟和实验研究,也支持了现有的宝光理论^[8,9]。

现有的宝光理论尚有不足之处:米氏理论只给出了宝光问题的数值解,物理意义不够清楚;范德赫尔斯特理论中的两个系数之比值(c_1/c_2)缺乏严格的理论依据;努森兹维格理论又涉及了一些高深的数学物理知识。另外,大气光象中的多数(如虹、华等)都有了能解释其特征的简单模型,人们困惑不解的是,难道就没有能揭示宝光特征的简单的模型?

正如努森兹维格所指出,宝光也许代表了一个新的光学领域,宝光现象是一个相当复杂的光学现象。对于宝光的理论研究和实验研究尚待深入进行。

- [1] 陈中轩,物理通报, No. 1(1983), 62.
- [2] 《辞海》(修订稿),理科分册(下),上海辞书出版社编辑出版,(1978).
- [3] H. M. Nussenzveig, *J. Opt. Soc. Am.*, **69** (1979), 1068.
- [4] H. G. Houghton, *Physical meteorology*, London, The Mit Press, (1985).
- [5] H. C. Bryant and A. J. Cox, *J. Opt. Soc. Am.*, **56** (1966), 1529.
- [6] H. C. Van de Hulst, *Light Scattering by Small particles*, Wiley, New York, (1957).
- [7] V. Khare and H. M. Nussenzveig, *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 1279.
- [8] P. Gillis et al., *J. Phys. Am.*, **50** (1982), 416.
- [9] H. C. Bryant and N. Jarmie, *Scr. Am.*, **231-7** (1974), 60.

非晶硅半导体及其在传感技术中的应用

魏光普

(上海科学技术大学材料科学系 上海 201800)

叙述了非晶硅半导体的结构、制备方法及特性,介绍了非晶硅在制作光电传感器、色敏传感器、放射线(X射线等)传感器及应变传感器等方面的应用,并介绍了这些传感器的大致结构、输出特性及有关的应用。

Abstract

The structure, preparation and properties of amorphous silicon (a-Si) material were described. The application of a-Si in sensors, such as photodiode, colour sensor, X-ray sensor

物理

and stress sensor etc. , were discussed.

自从1972年英国物理学家 Spear 利用辉光放电法制得优质的非晶硅以来,非晶硅及其合金作为一类新的半导体材料,受到全世界的关注,发展速度很快.现在它已被广泛应用于太阳能电池、光电元件、复印机感光鼓、色敏传感器、薄膜晶体管等方面^[1].本文将就非晶硅的特性、制备及其在传感器方面的应用作一简单介绍.

所谓非晶硅就是非晶态(无定形)的硅,也就是其内部原子的排列不象结晶硅那样具有严格周期性的长程有序结构,而是只有短程序.实验分析表明,非晶硅中一个硅原子的周围基本上仍是四个硅原子,而且仍大致保持着四面体键的结构特征,只是四个化学键的键角和键长不象结晶硅那样具有完全确定的值,而是或多或少有些变动,致使晶格歪扭,失去长程有序性.

非晶硅早在1970年以前就有了,但那时大多都采用将硅蒸发或溅射的方法制得.用这些方法制得的非晶硅,由于其中存在着许多的悬挂键,使得半导体的 p 型和 n 型掺杂效应无法显示,也即无论掺三价的硼或是五价的磷都不能使它变为 p 型或 n 型的半导体.这是因为掺入杂质所产生的电子或空穴往往会被这些悬挂键所捕获,而使它们不能参与导电.1972年, Spear 首次用硅烷(SiH_4)的辉光放电法制得了含有氢原子的优质非晶硅,这种非晶硅可以象单晶硅那样用掺磷或掺硼的方法使之变成 n 型或 p 型,从而可以用来制作半导体器件.这种含氢原子的非晶硅常常被称作为氢化非晶硅或硅氢合金,用 a-Si:H 来表示,其中字母 a 表示 Amorphous(非晶)的第一个字母,表示非晶体, Si:H 表示硅中掺有氢.但为简单计,现在一般都将含氢非晶硅简称为非晶硅,并用 a-Si 来表示.在氢化非晶硅中由于大多数悬挂键为氢原子填满,因此使禁带中局域能级的数目大为减少,掺杂效果大为改善,因此可以用磷烷(PH_3)和硼烷(B_2H_6)作为掺杂剂在很大范围内进行掺杂,使它变为 P 型或 N 型的半导体,为制作

半导体器件铺平了道路.

一、非晶硅的制备

氢化非晶硅一般用高频辉光放电法使硅烷放电分解并沉积在玻璃、不锈钢板等衬底上而制得.将硅烷及其他掺加的气体如磷烷、硼烷、甲烷等分别经过针阀、流量计等流入放电沉积室.放电室要用真空泵不断地抽气,使其中的压力维持在133—1333Pa 的低压状态.通过高频电极对放电室中的气体施加13.65MHz 的高频电压使气体产生辉光放电.硅烷 SiH_4 在高频电压的作用下分解成 Si, SiH, SiH_2 等原子或原子团.这些原子或原子团沉积在玻璃、金属等衬底上就形成非晶硅薄膜.

若在放电的气体 SiH_4 中加入 PH_3 和 B_2H_6 , 则可使非晶硅薄膜变成 p 型或 n 型的半导体材料.若在 SiH_4 中加入适量的甲烷(CH_4)、氨(NH_3)或锗烷(GeH_4)等还可得到非晶碳化硅(a-SiC)、非晶氮化硅(a-SiN)和非晶锗硅合金(a-SiGe)等.它们具有一些独特的性质,在非晶硅器件制作中具有特殊应用.

二、非晶硅的特性

(1) 在可见光谱区域内具有高的光吸收系数和光电导特性.

图1表示非晶硅(a-Si:H)、微晶硅($\mu\text{C-Si:H}$)和结晶硅(C-Si)的光学吸收系数与光波长的实验关系曲线.从中可以看出在可见光区域(0.1—0.7 μm),非晶硅对光的吸收都比结晶硅大,在0.5 μm 区域附近,要大10倍以上,正因如此,在制作光电池时,很薄的非晶硅薄膜即可代替较厚的单晶硅片.例如非晶硅太阳电池的厚度一般约为500nm 左右,比单晶太阳电池的厚度0.5mm 要小1千倍,大大节约了原料.

另外,非晶硅具有很好的光电导性质,非晶硅的暗电导率很小,约在(10^{-9} — 10^{-11})/ $\Omega\cdot\text{cm}$

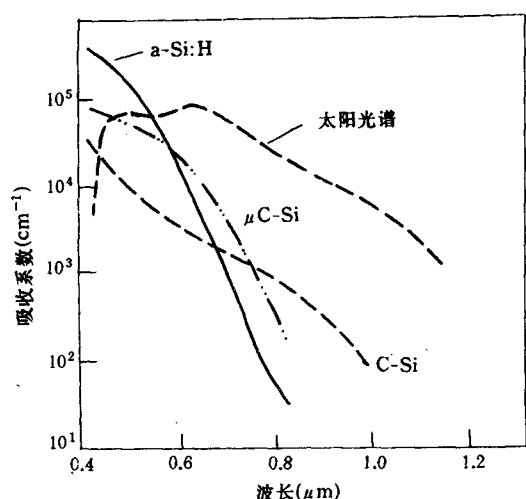


图1

的量级,但在 AM1 的光照条件下,电导率可达 $(10^{-3}-10^{-5})/\Omega\cdot\text{cm}$ 的量级,光电导率 σ_{ph} 与暗电导率 σ_{d} 的比 $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{d}}$ 近于 10^5-10^7 . 这正说明优质的非晶硅具有优异的半导体性能.

(2)非晶硅薄膜的沉积生长温度很低,一般在 $180-250^\circ\text{C}$ 左右,因而能耗低,成本少.

(3)非晶硅可以形成禁带宽度各不相同的多种非晶合金,而且每种非晶合金的禁带宽度还可以用调节成分的方法在一定范围内进行调节,以满足各种器件的需要.

(4)非晶硅及其合金可用掺杂的方法使之成为 n 型或 p 型,有利于器件的制造.

非晶硅除了具有上述优点外,也有缺点.首先是它的内部构造的混乱性导致电子和空穴等载流子的寿命短,扩散长度小,往往使器件特性下降.其次是在长期的强光照射下,会产生光疲劳效应,使光电导和其他特性下降,称为 Staebler-Wronsky 效应.

在非晶硅器件工艺中还经常使用微晶硅,微晶硅的结构介于结晶硅和非晶硅之间,即存在着许多小范围(几个 nm 至几十个 nm)的有序结构,而在有序结构之间,则是原子无序排列的非晶态结构.微晶硅也可以掺杂使之成为 n 型或 p 型,并且具有电导率高,与铝等金属能形成良好的欧姆接触等特性,因此在非晶硅器件中常被应用.在用辉光放电法制备非晶硅时,只

要适当改变制作条件,例如,将高频放电功率或衬底温度适当提高,或改变硅烷的氢气稀释比,就可制得微晶硅.

三、非晶硅在传感技术中的应用

1. 非晶硅光电传感器——光电池

目前非晶硅的一个最重要的应用是制作非晶硅太阳电池或光电池,使光能转化成电能,光信号转化为电信号.

一般的非晶硅光电池的结构如图2所示.它可以制作在带有透明导电薄膜(ITO 或 TCO)的玻璃板上,也可以制作在不锈钢等金属板上.

与单晶硅光电池不同,非晶硅光电池不能简单地采用 p-n 结的结构,而必须在 p 层和 n 层之间加入一层不掺杂的本征层,称为 i 层.这是因为单纯的 p-n 结中,由于非晶的 p 区和 n 区缺陷很多,局域态密度很高,再加上载流子浓度大,致使隧道电流占主导地位,无法显示整流特性,而是呈现欧姆接触性.当 p 层和 n 层之间加入 i 层时,因 i 层中局域态密度较低,而且几乎全部是耗尽层,因此隧道电流被抑制,能呈现很好的整流特性.一般光电池的 p, i 和 n 各层分别控制在 15nm , $200-600\text{nm}$ 和 50nm 左右,由于非晶硅的禁带宽度约为 1.7eV ,而 p 层和 n 层的费米能级分别位于离价带顶和导带底约 0.3eV 左右的位置,因此在平衡时, p 层和 n 层之间有 $1.0-1.2\text{eV}$ 左右的扩散电位差,从而在 i 层中产生强度 10^4-10^5V/cm 的内建电场. i 层被称为激活层,它是产生光生载流子的主要区域.

当外来光子透过 p 层进入 i 层时,就会激发出电子-空穴对,所产生的电子和空穴在内建电场作用下,分别被扫入 n 区和 p 区,并被电极收集,形成光生电动势.

利用禁带宽度较大的非晶硅碳合金(a-SiC)来代替非晶硅作 p 型的窗口层,就可以使更多的短波光穿过 p 层进入激活层(i 层),可大大提高光电池的短波灵敏度和太阳电池的光电转换效率.

与单晶硅太阳能电池相比,非晶硅太阳能电池的特点是短波响应好,光谱响应与人眼的视感度曲线配合得很好,有利于制作色敏传感器.图3画了二种光电池的相对光谱响应曲线,以作比较.非晶硅太阳能电池的另一特点是改变本征层的厚度可以

改变光电池的光谱响应.一般说来,随着i层的变厚,短波响应变差,响应曲线峰值向长波方向移动,这是因为非晶硅对长波光的吸收系数比短波光小的缘故.图4是作者实验得到的光谱响应峰值波长随i层厚度变化的实验曲线.

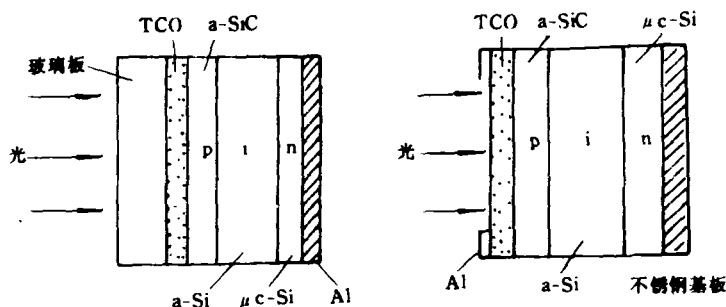


图2 两种不同构造的非晶硅太阳能电池

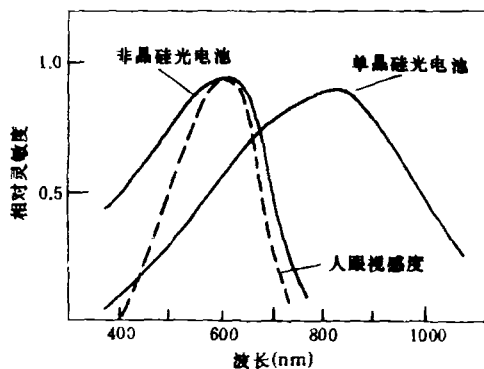


图3

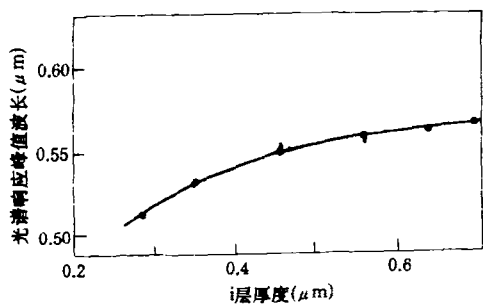


图4

采用合适的工艺,可以制得输出光电流与光照强度的线性关系很好的光电池.光电池的暗电流决定着低照度时光电流线性关系的下限.暗电流愈小,可测的照度范围就愈宽,光电池的特性就愈好.非晶硅太阳能电池的暗电流可以达到 10^{-11} A/cm²左右.光电池的响应时间 τ 与

其内阻 R_s 、结电容 C_j 和外电阻 R_L 有关,一般可表为:

$$\tau = AC_j(R_s + R_L)$$

其中A为一常数,实验表明,负载电阻对响应时间的影响很大.一般光电池的响应时间约在1~100 μ s之间.

现在非晶硅太阳能电池已经得到了广泛应用,特别是集成度很高的大长度和大面积光电阵列的出现,在解决很多非电量的电测问题上有许多重要应用.例如,用透镜和直线型光电阵列组成的系统,可用来测定轧钢时灼热钢锭的移动速度,在热膨胀测试仪中用于测量热膨胀系数,还可以用作传真机的文字图形的读出器.目前已可制成每毫米有8个,一共有1728个光电池

(相当于A₄纸的宽度)和2048个光电池(相当于B₄纸的宽度)的大长度光电池阵列。

2. 非晶硅色敏传感器^[2]

若在非晶硅光电池的进光侧贴上红色滤波片,就可以成为仅对红色光敏感的单色敏传感器,相似地若加上的滤波片的绿、蓝、黄等颜色时,就可制得绿、蓝、黄单色敏传感器。

利用三原色原理,还可以制成全色敏传感器。我们知道,用红、绿、蓝(或红、黄、蓝)三种原色按适当比例搭配,可以配制成各种不同颜色。反之,任何一种颜色也可以分解成不同比例的红、绿、蓝三种原色。按此原理制成的集成型全色敏传感器其结构如图5所示。在带有透明导电膜的玻璃板上,用辉光放电法制作三个靠得很近但相互分立的光电池,然后在三个光电池的进光侧,分别贴上红(R),绿(G)和蓝(B)三种滤色片,就成为全色敏传感器了。这种滤色片可用有色玻璃制成。图6是某种全色敏传感器的三个光电池的相对灵敏度曲线。

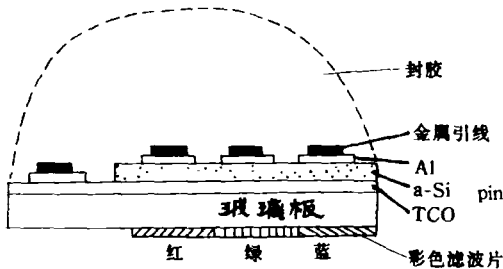


图5 非晶硅集成型全色敏传感器的结构示意图

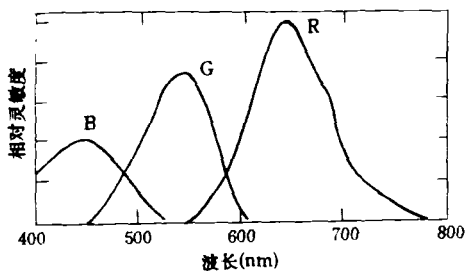


图6 非晶硅全色敏传感器的光谱响应特性

利用全色敏传感器可以进行色鉴别。当一种颜色的光,经过红、绿、蓝滤色片后,就被分解成为红、绿、蓝三种成分的光而分别进入对应的光电池,从而得到一定比例的三个电信号 I_R, I_G 和 I_B 。物理

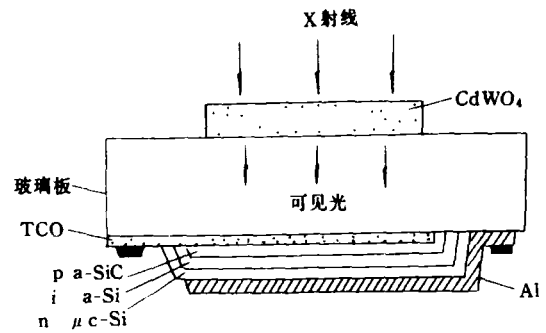


图7 非晶硅X射线传感器结构示意图

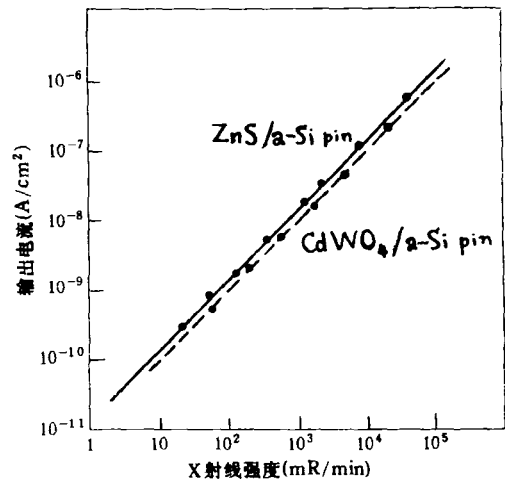


图8 非晶硅X射线传感器特性曲线

和 I_B ,将这三个电信号进行放大并输入后继电路或计算机系统,就可进行色判别、色记忆等,这在纺织品、印刷品、油漆涂料等色差管理方面都可得到不少应用。

我们研制了色敏传感器和色差判别仪。将照明光源的光经透镜系统会聚成平行光束后投射到欲进行色判别的物体上,再将从物体上来的反射光输入色敏传感器。从色敏传感器得到的红、绿、蓝三个电信号经放大和A/D转换后得到 I_R, I_G 和 I_B 三个信号电流值,然后再用专用电路计算出每个电信号的色电流比:

$$C_R = \frac{I_R}{I_R + I_G + I_B}$$

$$C_G = \frac{I_G}{I_R + I_G + I_B}$$

$$C_B = \frac{I_B}{I_R + I_G + I_B}$$

将它们的值分别与标准值对比,并显示之,即可进行色判别。使用这种信号处理方法的优点是

对光源稳定性的要求降低了. 但实践证明, 色判别仪中光源的稳定性仍很重要, 而且光源的色度和投射方向均对仪器稳定性有很大影响.

3. 非晶硅 X 射线传感器^[3]

作者研制了三种类型的非晶硅 X 射线探测器^[3]. 第一种是直接利用非晶硅 pin 光电池的 X 射线光电效应, 实践证明光电池的输出电流与射线强度之间有很好的线性关系, 而且可以做得很薄, 可以用于医疗或工业用 X 射线装置, 作照射剂量控制. 第二种是利用非晶硅光电池与闪烁晶体(或荧光体)相组合的方式. 图7是作者研制的医疗用16道颅脑 X 射线断层摄影(XTC)装置用的 X 射线探测器的结构示意图. 当 X 射线照到闪烁晶体上时, 被激发出的可见光穿过玻璃衬底而进入非晶硅光电池, 从而产生与 X 射线强度成正比的光电流. 图8是这种 X 射线探测器的特性曲线, 可以看到光电流的大小与 X 射线有很好的线性关系. 利用这种 X 射线探测器已成功地得到了人体头部的 XCT 图像. 第三种类型的非晶硅 X 射线探测器, 采用了高纯单晶硅与非晶硅的异质结构 p a-Si/n C-Si/n⁺ a-Si. 由于单晶硅的纯度高, 载流子寿命长, 非晶硅沉积的低温工艺又可使载流子寿命缩短, 因而载流子收集效率高, 信号电流大.

4. 非晶硅应变传感器和压力传感器^[4]

非晶硅薄膜的电阻会随着其受应变或受压力的情况而改变. 图9为室温暗电导率为 $7.9 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ 的 p 型微晶硅薄膜和室温暗电导率为 $4.7 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ 的 N 型薄膜的电阻变化率 ΔR

$/R$ 与应变变量 ϵ 的关系. 利用电阻率与应变、压力的关系, 可以制作非晶硅应变或压力传感器. 这种应变传感器主要由长条形微晶硅膜和二端的电极构成.

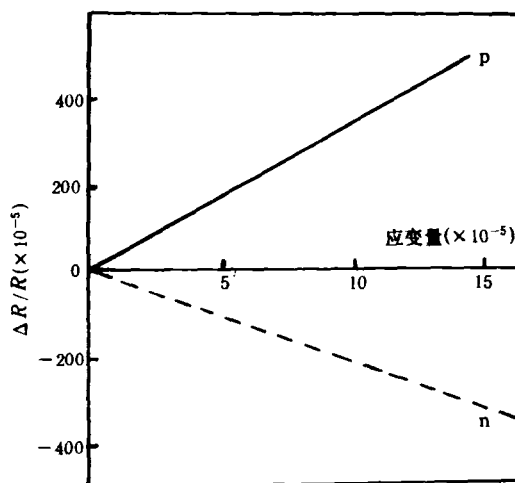


图9 非晶硅薄膜电阻变化率与应变量的关系

此外, 非晶硅在制作摄像管、电子照相感光板及复印机感光鼓、薄膜晶体管等方面也有很多应用, 不再一一叙述.

- [1] Y. Hamakawa, (Ed.), Amorphous Semiconductor Technology and Devices, JARECT Ser. 21 Ohmsha, Tokyo and North-Holland, Amsterdam, (1989).
- [2] Y. Kuwano, et al., Proceeding of the 3rd Sensor Symposium, Tokyo, (1983), 97.
- [3] 魏光普等, 应用物理(日文), 55-8(1986), 824.
- [4] 高橋清, 小長井誠(編集)最新 アモルファスSi ハンドブック, (1983), 380.