文章编号: 1007 - 4252(2023) 04 - 0004 - 229 DOI: 10.20027/j.gncq.2023.0032

三维基底表面碳基透明电极的研究现状及展望

杨志伟
(吉林工业职业技术学院 智能制造学院,吉林省 吉林市 132013)

摘要: 三维基底表面上制备的透明电极具备散射高、比表面积大的性能优势,基于此,一方面可以提升太阳能电池的光电转化效率,另一方面比表面积大可以提升透明电容器的电荷储量。当前,已经进行的研究主要是以银纳米线为主的金属纳米线透明电极技术,然而金属纳米线一方面成本高、另一方面金属本身的特性与半导体材料配合使用时有一定的局限性。相比而言,碳基材料(主要为碳纳米管、石墨烯) 的成本低,同时碳与当前的主要半导体材料硅为同一主族元素,因此相比于金属材料更有利于和半导体材料结合。基于上述内容,碳基材料制备到三维基底表面上具有更深远的研究意义。

关键词: 三维基底表面; 光电转化效率; 透明电极; 金属纳米线; 碳基材料
中图分类号: TM23 **文献标志码:** A

Research Status and Prospects of Carbon Based Transparent Electrode on Three-dimensional Substrate Surface

YANG Zhi-wei
(1.School Of Intelligent Manufacturing, Jilin Vocational College of Industry and Technology, JiLin 132013, China)

Abstract: The transparent electrode prepared on the three-dimensional substrate surface has the performance advantages of high scattering and large specific surface area. Based on this, on the one hand, it can improve the monochromatic incident photon-to-electron conversion efficiency of the solar cell, on the other hand, the large specific surface area can improve the charge storage of the transparent capacitor. At present, the research that has been carried out is mainly the transparent electrode technology of metal nanowires based on silver nanowires. However, on the one hand, the cost of metal nanowires is high, on the other hand, the characteristics of metal itself and the use of semiconductor materials have certain limitations. In contrast, the cost of carbon-based materials (mainly carbon nanotubes and graphene) is low. At the same time, carbon and the current main semiconductor material silicon are the same main group element, so compared with metal materials, it is more advantageous to combine with semiconductor mate-

收稿日期: 2023-07-16; **修订日期:** 2023-08-14
基金项目: 本文系吉林工业职业技术学院 2023 年度教育学会教学类课题"拓展 MOSFET 芯片工艺仿真技能提升高职学生就业能力的研究与实践——机电一体化专业学生为例"(课题编号: 23jyy04) 的研究成果之一.
作者简介: 杨志伟(1990-) ,男,硕士,助教,主要研究方向为半导体纳米材料(E-mail: yangzhw2014@ lzu.edu.cn) .

rials. Based on the above contents, the preparation of carbon-based materials on three-dimensional substrate surface has more far-reaching research significance.

Key words: 3D Substrate Surface; Monochromatic Incident Photon-To-Electron Conversion Efficiency; Transparent Electrode; Metal Nanowires; Carbon-Based Material

0 引言

具备三维(3D)结构表面的光电子器件由于可用于光子捕获效应的大表面积而变得越来越重要,例如硅基阵列太阳能电池[1]、InGaAs 基纳米线太阳能电池[2]、InGaN 量子阱太阳能电池[3]、核壳阵列光电探测器[4]、InZnO 基光敏阵列光电探测器[5]。透明电极也是光电子器件中非常重要的部件。目前,平面透明电极针对光生载流子的收集不足。因此,新型光电器件需要一种可以沉积在具有 3D 结构表面的非常规衬底(3D 衬底)上的透明电极被提出(如图 1 所示)[6]。由于低电阻(10-20/sq)和高透明度(80-90%)的结合,氧化铟锡(ITO)仍然是主要的商用透明电极材料。然而,使用常规的制备方法在微/纳米柱的某些特殊区域(如侧壁和角落)上生长均匀和连续的 ITO 膜是困难的,主要由于 ITO 的主要镀膜工艺为磁控溅射,该工艺主要采用物理法制备,因此限制了 ITO 在具有 3D 结构表面的光电器件中的应用[7-9]。

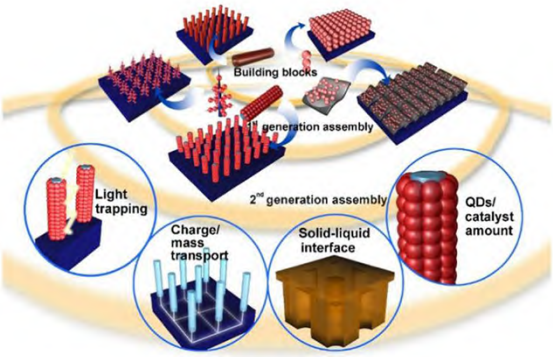

图 1 三维衬底表面光电器件结构示意图

银纳米线(AgNWs)网络(如图 2 所示)是 ITO 的一种非常有前途的替代物,因为其低薄层电阻、高光学透射率,以及由于 AgNWs 的导电性和延展性而具有的突出高性能。并且于 2017 年-2018 年兰州大学物理科学与技术学院电子材料研究所通过化学的旋涂法获取三维基底表面的透明电极[10]。最后研究表面,三维基底表面的透明电极具备高机械柔韧性、高光透过率和高导电性,已经证明了其结构的可行性[11]。

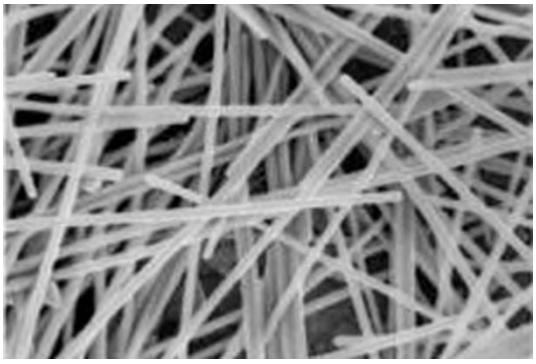

图 2 金属纳米线网络

碳基透明导电薄膜当前发展也非常迅速,其中碳纳米管(CNTs)[12-13]、石墨烯(Graphene)是其中的代表,该两种材料皆具备良好的透明导电性以及机械柔韧性,碳纳米管(CNTs)、石墨烯(Graphene)也可以制备成分散液进而进行旋涂法制备薄膜的能力,这些特性与银纳米线的性能相接近,有了基础的替代能力。同时,相较于银纳米线的高成本,碳基材料的元素成本更低,同时碳基材料与当前主要的半导体材料硅为同一主族,对于未来推向和半导体材料的结合使用更有利。

通过兰州大学已经有的相关工作经验,即在非常规 3D 衬底上成功地制备了新型透明 AgNWs/ZnO 薄膜电极。使用薄 ZnO 层来避免 AgNWs 膜的氧化并增强 3D 衬底上的机械粘附。所有结果表明,Ag-NWs/ZnO 薄膜电极在光学透明度、电导率、机械稳定性和热稳定性方面表现良好。所有这些指标都与传统 ITO 的指标相当。这项工作为具有 3D 结构表面的光电子器件的设计和制造提供了一种新的策略[10-11]。基于在金属纳米线已经取得的成果,在对比金属纳米线悬浮液与碳基在亲疏水性也有一定的相似性,可进行新的材料选择的可能性。

具体研究方案可以为,将 Graphene/CNTs 悬浮液旋涂到 3D 图形化基底上。沉积后,在一定温度下干燥膜,通过重复上述步骤的次数以及悬浮液的

浓度以制备具有不同分布密度的 CNTs/Graphene 网络膜。然后在不同温度下在 Ar 中退火一段时间,通过高温烧结使得碳基网络膜结合的更紧密,从而降低结电阻以及膜与基底的结合力,最后分析碳基材料在透明电极应用上的不足及优势。

1　石墨烯基透明电极的制备及性能分析

1.1　引言

光电器件,包括有机发光二极管(OLED)[14]、有机太阳能电池(OSC)[15]、场效应晶体管(FET)[16],近年来得到了广泛发展。在所有上述光电子器件中,透明电极是普遍必不可少的。目前,包括氧化铟锡(ITO)、掺杂铝的氧化锌和掺杂氟的氧化锡(FTO)[17]的导电金属氧化物主导了商业透明电极的市场。虽然 ITO 因其低方块电阻和可见光透过率而被最广泛地用于制造透明导电膜(TCF),而在酸性和碱性条件下化学稳定性较差、高成本以及其脆性大的劣势,使得 ITO 难以满足日益增长的光电子需求。石墨烯由于其在可见光和近红外(NIR)区域的优异导电性和光透过率[18][19],是透明电极重要的备选材料。此外,石墨烯具有高度的柔韧性和优异的化学稳定性[20]。由于其高电子迁移率,单层石墨烯(如图 3 所示)可以实现较低的薄层电阻。单层石墨烯的光学吸收率低至 2.3%以下。然而,如何做到生产过程中没有任何缺陷和污染物的大面积单晶石墨烯仍然是一个亟待解决的问题。在石墨烯薄膜的制备过程中,经常会引入缺陷、褶皱和畴边界等异常。例如,在通过化学气相沉积(CVD)方法生长的石墨烯的转移过程中,总是引入褶皱,从而降低了载流子传输电子的迁移率。当将氧化石墨烯(GO)还原为石墨烯时,也在一定程度上引入一些缺陷。所有这些缺点都降低了石墨烯的导电性,从而限制了其在器件中的应用。

因此,在实践中很难实现完美石墨烯的性能特征。基于此相关科技人员已经做了许多努力来弥合理论和实践之间的差距,主要通过三种方法包括:提高石墨烯的质量、制备石墨烯和其他物种的混合材料系统以及优化器件的结构。为了提高石墨烯的质量,已经应用了可控的合成方法,并使用了新的转移方法。

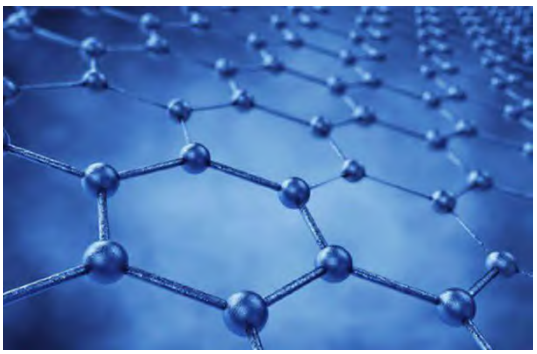

图 3　单层石墨烯示意图

1.2　石墨烯的制备

石墨烯是一种较适合用于透明导电薄膜的材料,然而其具有一定的缺陷,为此相关科学家进行了一系列的优化。当前主要的制备工艺包括两个,即化学气相沉积法(CVD)、氧化还原法,以下将就该两种方法进行相应的论述。

化学气相沉积法(CVD)是通过在各种基底(Ni、Cu、Pt、Ru 或 Ir)上生长石墨烯来实现高质量、大规模和连续石墨烯膜的有利方法[21][22]。化学气相沉积法(CVD)生长的石墨烯的薄层电阻为每平方几百欧姆,其光吸收损耗几乎与理想值一样低(接近每层 2.3%)。通常而言,石墨烯转移过程对于基于化学气相沉积法(CVD)方法制造透明导电薄膜(TCF)是必要的[23][24]。在此过程中,石墨烯膜通常从金属衬底转移到目标衬底。然而,转移过程将导致开裂和引入残留物,从而降低石墨烯的物理性能并限制基底的选择。因此,近些年如何改进转移石墨烯基透明导电薄膜成为了一个重点。

1.3　石墨烯基透明电极的制备

首先,如何改性合成是其中一种重要的技术,直接提升石墨烯本身的性能,制备出纯度更高、更接近单层石墨烯的工艺就显得格外重要,石墨烯薄膜受到石墨烯晶粒尺寸和边界的强烈影响[25],为此需要进行更精细的技术提升。

其次,如何将高纯度的石墨烯完整的转移到新的目标衬底上而尽量降低转移过程中的缺陷和污染的引入。通常采用两种类型的转移方法,包括湿转移或干转移,将石墨烯转移到目标基底上[26]。常规的湿转移过程从在石墨烯层上旋涂薄膜聚合物层开始。首先在溶液中蚀刻金属,然后将聚合物涂覆石

墨烯到目标基底上，最后通过溶解在相应溶剂中去除聚合物层。在干转移过程中，在铜箔上生长的石墨烯薄膜，然后通过压力附着到热释放带上。在蚀刻铜箔之后，将胶带上的石墨烯膜转移到目标基底上，然后用温和的热量释放热胶带，从而实现将石墨烯薄膜转印到目标基底上（具体如图 4 所示）[27]。

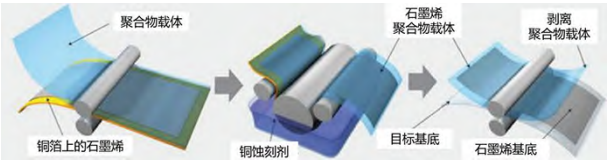

图 4 石墨烯薄膜通过干法转移到目标基底上

当前最主要的生产方式是卷对卷转移法，卷对卷转移法适用于大面积石墨烯膜的连续工业生产。几乎所有的卷对卷转印方法都基于干转印方法。该方法包含五个基本步骤：（1）在卷绕部分固定覆盖石墨烯的铜箔和热释放胶带；（2）铜箔附着在热释放带上；（3）蚀刻金属箔；（4）将具有石墨烯膜的热释放带附着在目标基板上；（5）释放热释放胶带。为了提高石墨烯薄膜的质量和成本，人们对这些步骤进行了许多改进。例如，通过在热去离子（DI）水中延迟，实现了用于将通过化学气相沉积法（CVD）在铜上生长的大面积石墨烯转移到透明 EVA/PET 塑料基底上的绿色卷对卷转移方法[28]。

同时，也可以将生产出来的石墨烯材料溶于例如 N，N-二甲基甲酰胺（DMF）、N—甲基吡咯烷酮（NMP）以及其他醇类溶液中。这对于未来制备三维基底表面石墨烯基透明电极提供了材料支持。

2 碳纳米管基透明电极的制备及性能分析

2.1 引言

如今，大多数人每天都会遇到光电设备，如触摸屏和显示器。这些设备包含一个共同的组件-透明导电薄膜（TCF），它可以用作液晶显示器（LCD）中的透明电极。在典型的 LCD 设备中，液晶在两个电极之间产生的电势下排列，为了看到颜色，其中一个电极必须是透明的。透明导电薄膜（TCF）的另一个应用是触摸屏设备，通常分为电阻型和电容型。此外，透明导电薄膜（TCF）用作防止电磁干扰（EMI）的电磁屏蔽层。这可以通过使用具有高导电性的材料（例如金属或导电聚合物）作为屏蔽封装来实现，同时允许光透射[29]。各种电子和光电子器件具有类似的结构，其中透明导电薄膜（TCF）是最重要的材料之一。如今，用于制造透明导电薄膜（TCF）的最常见材料是金属氧化物，而最广泛使用的氧化物是氧化铟锡（ITO），其市场份额超过 97% 的透明导电涂层[30]。氧化铟锡（ITO）涂层的特点是低薄层电阻，在可见光范围内的光学透明度约为 90% 时，低至 10Ω/sq[31]。然而，氧化铟锡（ITO）有几个缺点，例如高生产成本，需要特殊的蚀刻工艺以实现图案化，以及需要相对稀有的元素铟。另一个缺点是 ITO 薄膜的脆性大阻碍了其用于制造柔性可弯曲、可拉伸设备收到限制。

受限于 ITO 性能的局限性，大量替代材料被研究，其中碳纳米管（CNTs）成为一个重要的研究方向。碳纳米管（CNTs）是通过将石墨烯片折叠成圆柱形中空结构而形成的，其中壁由碳原子构成。石墨烯片的手性可能不同，根据这一点，碳纳米管（CNTs）可以具有半导体或金属性能。它们既作为单壁碳纳米管（SWCNT）也作为多壁碳纳米管（MWCNT）存在（如图 5 所示），并且具有几微米到几十微米的典型长度。SWCNT 的直径通常在 0.4-4 nm 的范围内，而 MWCNT 的外径在几纳米到几十纳米的范围内[32]。碳纳米管整体导电性较好，然而在大多数情况下，由于存在各种缺陷或杂质，单个 CNT 的电阻率以及其组件的电阻率要高得多[33]。但同时由于单个碳纳米管具有优越的机械性能，由碳纳米管制成的薄膜是生产柔性电子器件的理想候选材料[34]。

2.2 碳纳米管的制备

碳纳米管的生产有三种主要方法：电弧放电[35]、激光烧蚀[36]和化学气相沉积（CVD）[37]。电弧放电方法通常需要高温（高于 1700℃）。尽管最重要的是使用的方法是在两个石墨水冷电极之间用氦气在低于大气压下进行直流放电，也使用氢气和甲烷气。CNT 被吸引到阴极，而阳极被消耗。如果不使用催化剂，通常通过该方法生产 MWCNT。另一方面，用于生产 SWCNT 的方法通常需要金属催化剂（Fe、Ni、Co、Mo、Y）。如果需要高质量和高纯度的 SWCNT，则使用纯石墨的激光诱导蒸发/烧蚀

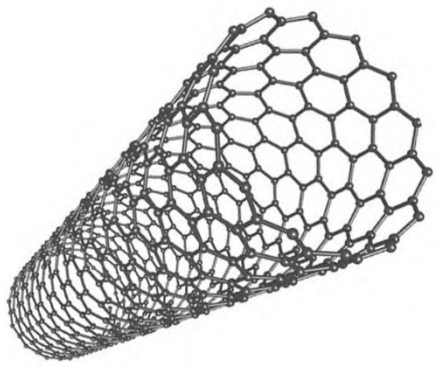

图 5　碳纳米管示意图

(通过 Nd: YAG 或 CO2 激光) [37] 。化学气相沉积法催化、热或等离子体增强,即碳氢化合物或一氧化碳的催化分解,也是获得高纯度 CNT 的常用方法。先前已经表明,CNT 也可以通过使用一氧化碳作为碳源进行火焰热解制备 [38] 。还证明了一种有机合成方法,以形成具有良好分散性的均匀 CNT 结构。通过利用环状碳大环(保留关于手性和直径的信息的 CNT 的小片段) 进行合成,其用作聚合反应的模板以生产长碳纳米管。另一种自下而上生产 MWCNT 的方法是在 700－800℃ 下,在 60－100MPa 的压力下,用镍催化剂对聚乙烯与水或乙二醇与水的混合物进行水热处理,并采用电解工艺,其中包括将石墨阴极浸入碱金属或碱土金属的熔融氯化物中。

2.3　碳纳米管透明电极的制备

有多种方法可用于通过湿沉积制备 CNT 透明导电膜,包括: 棒涂 [39] 、旋涂 [40] 、喷涂 [41] 、浸涂 [42] 、滴涂 [43] 、真空过滤,然后转移到合适的基底上 [44] ,电泳沉积,然后热压转移 [45] ,以及喷墨印刷。提高膜导电性的最佳方法是堆叠越来越多的 CNT 层,然而,增加材料量将导致透明度降低。具有适用于大多数电子应用的透明度的 CNT 膜具有 50nm 的典型厚度。由于 SWCNT 与 MWCNT 相比具有更高的导电性,因此它们优选用于制造导电透明膜。根据膜厚度和制备方法,玻璃和塑料基底上此类膜的典型薄层电阻和透明度通常分别在 60－870Ω/sq 和 70－90%(通常在 550 nm 下测量) 的范围内。例如,从氯磺酸超酸将 CNT 沉积到 PET 上导致 TCC 薄层电阻为 60Ω/sq,光透过率为 90.9%。近期有报道称,对于透明度高达 82%的混合薄膜,其薄层电阻甚至更低,为 4－24Ω/sq。这一结果是通过将 AgNWs 与 CNTs 组合而实现的。通过 AgNWs 和 SWCNTs 的混合分散体的纤维素酯膜进行真空过滤,然后将膜转移到玻璃基底上来制备混合膜。结果表明,SWC－NTs 包裹了 AgNWs,从而形成了导电互连以及机械支撑,为膜提供了结构完整性。结果表明,SWCNTs 包裹了 AgNWs,形成了导电互连以及机械支撑,为膜提供了结构完整性 [46] 。

基于 CNTs 基透明电极在太阳能电池和触摸屏中的应用已经有报道 [47] 。例如,通过将浸涂与硝酸处理相结合来制备低粗糙度 SCWNT 膜。然后将这些透明电极作为阳极用在有机太阳能电池中。发现富含金属的 SCWNT 阳极产生的功率转换效率是半导体 SCWNT 阴极的 50 倍。发现对于基于 SWCNT 的有机光伏(OPV) 电池效率为 2%,而对于基于 ITO 的 OPV 效率为 3.1%。塑料基底上的 CNT 膜也被并入电阻触摸面板中作为触摸电极。通过四探针测试显示,与 ITO 触摸电极相比,其机械性能优越,器件功能性无损失,致动次数高达 300 万次。四探针测试显示,在 100 万次触针循环后,设备线性度没有损失。PET 上的 CNT 膜在可见光范围内具有 86%的总透射率(包括 PET) 和 600Ω/sq 的薄层电阻,这是由于碳纳米管之间存在较大接触电阻以及碳纳米管内部纯度不够的问题导致。目前,仅有极少数商业 CNT 膜可作为 ITO 的竞争对手 [30] ,但由于在该材料方面进行许多研究活动,预计不久的将来会有更多 CNT 膜被研发并优化。

3　三维基底表面碳基透明电极的制备及性能分析

3.1　引言

基于上述针对石墨烯和碳纳米管相关性能的研究,同时对比银纳米线基透明电极的制备工艺发现,两者皆可以溶于悬浮液内,然后通过旋涂法进行制膜,借鉴于银纳米线在三维基底表面的制膜经验,可以拓展到碳基材料上面来,因此碳基材料具备技术可行性。

3.2　三维基底表面透明电极的应用

三维基底表面的优势在于其表面散射能力强。

先从光散射能力强的优势出发，其可以应用于染料敏化太阳能电池方面。当光照射到平面太阳能电池上以后其会产生全反射，而在三维基底表面上则会产生一定的内反射[48]（如图 6 所示），通过内反射可进行多次折射进而增加其光电转化效率。

提升光电转化效率的基本原理为基于扩散长度小于吸收深度的材料的太阳能电池表现出较低的能量转换效率[49]。采用数值模拟方法研究了有机太阳能电池在三维表面上的光学特性，有机太阳能电池层堆叠放置在纳米线阵列上。三维表面基底太阳能电池的实现是增强太阳能电池（如有机太阳能电池）光吸收的有前途的途径，这些太阳能电池受到低载流子扩散长度的限制。太阳能电池的 3D 结构允许电学和光学性质的解耦，因此可以实现高转换效率。此外，纳米线的 3D 排列允许增加光的吸收，这是由于改进了光的耦合，增加了太阳能电池的有效厚度和/或增强了太阳能电池中的光捕获。因此，吸收的增加会导致量子效率的提高和短路电流密度的增加。在传统有机太阳能电池的情况下，所有的界面都是平坦的，并且在有源层和后触点之间引入了间隔层，作为光学匹配层。所述间隔层的厚度变化，直到所述光强剖面的最大值置于所述光活性材料内，从而使短路电流密度最大化。为了允许在平面衬底上的有机太阳能电池和在纳米线阵列上的有机太阳能电池进行比较，光产生的电荷必须移动的距离设置为相等。然而，与平面太阳能电池相比，纳米线阵列上的有机太阳能电池吸收器的有效厚度明显增加。

综上所述，可以看出三维基底表面的太阳能电池具备比二维更大的光电转化效率，然而，如图 7 上图所示，传统的 ITO 透明电极的制备方法往往形成一个平面结构，与基底的结合不够，导致很多电荷需要经过电池体内然后输出到透明电极上，不利于电荷收集，然而通过旋涂制备的透明电极处于整体与电池接触的状态，无需电荷在电池体内传输，减少了电池的损耗。

3.3 三维基底表面碳基透明电极的制备

基于兰州大学[10, 11]和广东中图半导体科技股份有限公司[50]关于三维基底表面银纳米线基透明电极的技术经验。可先选择一个具有微观形貌的三维基底[51]，然后将石墨烯、碳纳米管分散在相应的

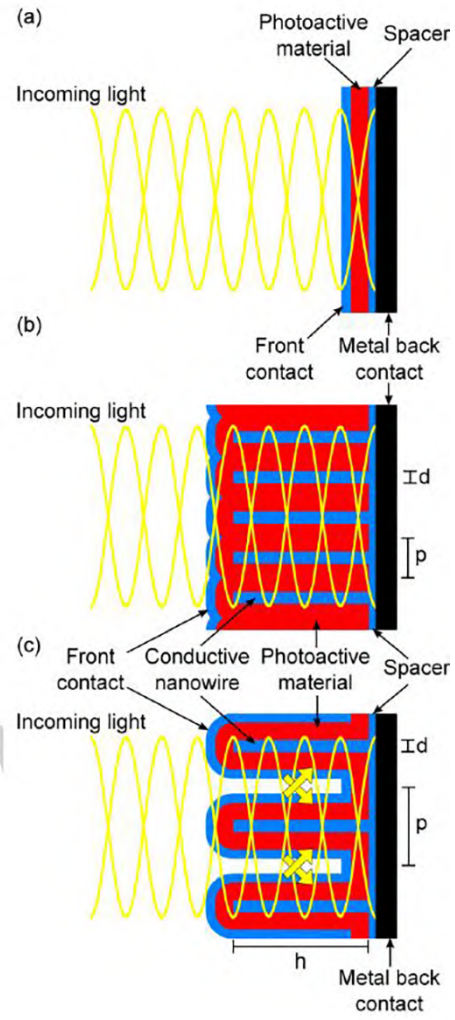

图 6 平面结构与三维基底标准在太阳能电池应用的示意图

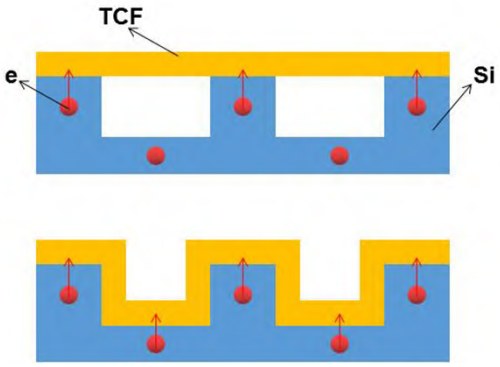

图 7 新型透明电极示意图

悬浮液内，然后将基底放置在旋涂机上固定，滴入悬浮液，再高速旋转形成薄膜，最后高温退火。薄膜的

光透过率及方块电阻(膜电阻)控制可通过控制旋涂次数、旋涂溶液浓度的控制以及退火温度的控制。

受限于不同基底表面亲疏水性的差异,除旋涂法外还可选用喷涂法镀膜,即选择一个喷涂设备,将基底置于喷涂设备的喷头下,借助喷头产生的喷雾形成薄膜,或在喷涂过程中同时针对衬底进行旋转完成旋喷涂的方法提升薄膜均一性。

部分透明电极对于导电性要求更高的情况下,也可以借助金属材料优良的导电性与碳基材料进行复合,即将碳基薄膜制备在基底上,然后在碳基薄膜上制备一层金属纳米线薄膜。

4　总结与展望

通过新型材料的制备与性能提升,未来的透明电极材料所使用的材料将更加多元化,做到成本更低、性能更佳、使用领域更加多元化。以石墨烯、碳纳米管为核心的碳基材料在解决接触电阻、材料提纯等相关技术后,可以作为重要的透明电极材料之一,而三维基底表面碳基透明电极的制备则是其重要的应用方向,可做到高散射、高机械性能、光透过的波段更广的优势。可以广泛应用于太阳能电池、超级电容器等相关领域。

长久以来,我国在基础材料的研发上落后于主要西方国家,近年来国家针对此进行了一系列的研发投入,鼓励创新,该技术特征则为一项重大创新点,相信未来我国的基础材料方面能够进一步发展赶超西方国家。

参考文献:

[1] Shin J C, Chanda D, Chern W, et al. Experimental study of design parameters in silicon micropillar array solar cells produced by soft lithography and metal-assisted chemical etching [J]. IEEE Journal of photovoltaics, 2012, 2(2): 129-133.

[2] Ma H, Wu W, Cao J, et al. Network structure and electromechanical properties of viscose-graphene conductive yarn assembles [J]. Carbon, 2017, 114: 731-739.

[3] Lin G J, Lai K Y, Lin C A, et al. Efficiency enhancement of InGaN-based multiple quantum well solar cells employing antireflective ZnO nanorod arrays [J]. IEEE Electron Device Letters, 2011, 32(8): 1104-1106.

[4] Xie C, Nie B, Zeng L, et al. Core-shell heterojunction of silicon nanowire arrays and carbon quantum dots for photovoltaic devices and self-driven photodetectors [J]. Acs Nano, 2014, 8(4): 4015-4022.

[5] Liu X, Jiang L, Zou X, et al. Scalable Integration of Indium Zinc Oxide/Photosensitive-Nanowire Composite Thin-Film Transistors for Transparent Multicolor Photodetectors Array [J]. Advanced Materials, 2014, 26(18): 2919-2924.

[6] Lan W, Yang Z, Zhang Y, et al. Novel transparent high-performance AgNWs/ZnO electrodes prepared on unconventional substrates with 3D structured surfaces [J]. Applied Surface Science, 2018, 433: 821-828.

[7] Donoval M, Micjan M, Novota M, et al. Relation between secondary doping and phase separation in PEDOT: PSS films [J]. Applied Surface Science, 2017, 395: 86-91.

[8] Park J H, Hwang G T, Kim S, et al. Flash-induced self-limited plasmonic welding of silver nanowire network for transparent flexible energy harvester [J]. Advanced Materials, 2017, 29(5): 1603473.

[9] Da S X, Wang J, Geng H Z, et al. High adhesion transparent conducting films using graphene oxide hybrid carbon nanotubes [J]. Applied Surface Science, 2017, 392: 1117-1125.

[10] Lan W, Yang Z, Zhang Y, et al. Novel transparent high-performance AgNWs/ZnO electrodes prepared on unconventional substrates with 3D structured surfaces [J]. Applied Surface Science, 2018, 433: 821-828.

[11] 杨志伟. 三维衬底表面银纳米线基透明导电薄膜的制备与性能研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.

[12] Dai H. Nanotube growth and characterization [M] //Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties, and applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001: 29-53.

[13] Dai H. Carbon nanotubes: opportunities and challenges [J]. Surface science, 2002, 500(1-3): 218-241.

[14] Yao L, Fang X, Gu W, et al. Fully transparent quantum dot light-emitting diode with a laminated top graphene anode [J]. ACS applied materials & interfaces, 2017, 9(28): 24005-24010.

[15] Bi H, Huang F, Liang J, et al. Transparent conductive graphene films synthesized by ambient pressure chemical vapor deposition used as the front electrode of CdTe solar cells [J]. Advanced materials, 2011, 23(28): 3202-3206.

[16] Nishizawa J, Terasaki T, Shibata J. Field-effect transistor versus analog transistor (static induction transistor) [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1975, 22(4): 185-197.

[17] Raja D S, Cheng P Y, Cheng C C, et al. In-situ grown metal-organic framework-derived carbon-coated Fe-doped cobalt oxide nanocomposite on fluorine-doped tin oxide glass for acidic oxygen evolution reaction [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2022, 303: 120899.

[18] Jie W, Hao J. Graphene-based hybrid structures combined with functional materials of ferroelectrics and semiconductors [J]. Nanoscale, 2014, 6(12): 6346-6362.

[19] Lee Y, Ahn J H. Graphene-based transparent conductive films [J]. Nano, 2013, 8(03): 1330001.

[20] Kang J, Sangwan V K, Wood J D, et al. Solution-based processing of monodisperse two-dimensional nanomaterials [J]. Accounts of chemical research, 2017, 50(4): 943-951.

[21] Liu Z, Lau S P, Yan F. Functionalized graphene and other two-dimensional materials for photovoltaic devices: device design and processing [J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44(15): 5638-5679.

[22] Song Y, Fang W, Brenes R, et al. Challenges and opportunities for graphene as transparent conductors in optoelectronics [J]. Nano Today, 2015, 10(6): 681-700.

[23] Li X, Zhu Y, Cai W, et al. Transfer oflarge-area graphene films for high-performance transparent conductive electrodes [J]. Nano letters, 2009, 9(12): 4359-4363.

[24] Reina A, Jia X, Ho J, et al. Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition [J]. Nano letters, 2009, 9(1): 30-35.

[25] Yu Q, Jauregui L A, Wu W, et al. Control and characterization of individual grains and grain boundaries in graphene grown by chemical vapour deposition [J]. Nature materials, 2011, 10(6): 443-449.

[26] Chen Y, Gong X L, Gai J G. Progress and challenges in transfer of large-area graphene films [J]. Advanced science, 2016, 3(8): 1500343.

[27] Bae S, Kim H, Lee Y, et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes [J]. Nature nanotechnology, 2010, 5(8): 574-578.

[28] Chandrashekar B N, Deng B, Smitha A S, et al. Roll-to-roll green transfer of CVD graphene onto plastic for a transparent and flexible triboelectric nanogenerator [J]. Advanced materials, 2015, 27(35): 5210-5216.

[29] Hu M, Gao J, Dong Y, et al. Flexible transparent PES/silver nanowires/PET sandwich-structured film for high-efficiency electromagnetic interference shielding [J]. Langmuir, 2012, 28(18): 7101-7106.

[30] Niu C. Carbon nanotube transparent conducting films [J]. MRS bulletin, 2011, 36(10): 766-773.

[31] Park S, Vosguerichian M, Bao Z. A review of fabrication and applications of carbon nanotube film-based flexible electronics [J]. Nanoscale, 2013, 5(5): 1727-1752.

[32] Cummins G, Desmulliez M P Y. Inkjet printing of conductive materials: a review [J]. Circuit world, 2012, 38(4): 193-213.

[33] Li Q W, Li Y, Zhang X F, et al. Structure-dependent electrical properties of carbon nanotube fibers [J]. Advanced Materials, 2007, 19(20): 3358-3363.

[34] Treacy M M J, Ebbesen T W, Gibson J M. Exceptionally-high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes [J]. nature, 1996, 381(6584): 678-680.

[35] Terrones M. Science and technology of the twenty-first century: synthesis, properties, and applications of carbon nanotubes [J]. Annual review of materials research, 2003, 33(1): 419-501.

[36] Szabó A, Perri C, Csató A, et al. Synthesis methods of carbon nanotubes and related materials [J]. Materials, 2010, 3(5): 3092-3140.

[37] Prasek J, Drbohlavova J, Chomoucka J, et al. Methods for carbon nanotubes synthesis [J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21(40): 15872-15884.

[38] Layani M, Kamyshny A, Magdassi S. Transparent conductors composed of nanomaterials [J]. Nanoscale, 2014, 6(11): 5581-5591.

[39] Dan B, Irvin G C, Pasquali M. Continuous and scalable fabrication of transparent conducting carbon nanotube films [J]. ACS nano, 2009, 3(4): 835-843.

[40] Hellstrom S L, Lee H W, Bao Z. ACS Nano 2009, 3, 1423 [ACS Full Text ACS Full Text] [J]. Google Scholar There is no corresponding record for this reference.

[41] Nirmalraj P N, Lyons P E, De S, et al. Electrical connectivity in single-walled carbon nanotube networks [J]. Nano letters, 2009, 9(11): 3890-3895.

[42] Saran N, Parikh K, Suh D S, et al. Fabrication and characterization of thin films of single-walled carbon nanotube bundles on flexible plastic substrates [J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, 126(14): 4462-4463.

[43] Bhattacharyya A R. T.. Sreekumar, T. Liu, S. Kumar, LM Ericson, RH Hauge, and RE Smalley, "Crystallization and orientation studies in polypropylene/single wall carbon nanotube composite," [J]. Polymer (Guildf), 2003, 44(8): 2373-2377.

[44] Hecht D S, Heintz A M, Lee R, et al. High conductivity transparent carbon nanotube films deposited from superacid

[J]. Nanotechnology, 2011, 22(7): 075201.

[45] Pei S, Du J, Zeng Y, et al. The fabrication of a carbon nanotube transparent conductive film by electrophoretic deposition and hot-pressing transfer [J]. Nanotechnology, 2009, 20(23): 235707.

[46] Stapleton A J, Afre R A, Ellis A V, et al. Highly conductive interwoven carbon nanotube and silver nanowire transparent electrodes [J]. Science and technology of advanced materials, 2013.

[47] Tyler T P, Brock R E, Karmel H J, et al. Electronically Monodisperse Single-Walled Carbon Nanotube Thin Films as Transparent Conducting Anodes in Organic Photovoltaic Devices [J]. Advanced Energy Materials, 2011, 1(5): 785-791.

[48] Knipp D, Jovanov V, Tamang A, et al. Towards 3D organic solar cells [J]. Nano Energy, 2017, 31: 582-589.

[49] Meng X, Xing Z, Hu X, et al. Large-area Flexible Organic Solar Cells: Printing Technologies and Modular Design [J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2022: 1-45.

[50] 康凯, 杨志伟, 陆前军, 等. 一种在图形化衬底上制备银纳米线基透明导电薄膜的方法: , CN108962497A [P]. 2018.

[51] Thorsten Matthias, Gerald Kreind, Viorel Dragoi, 等. CMOS 图像传感器晶圆级封装工艺的进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2013(5): 4.