第 45 卷第 11 期
2017 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 45，No. 11
November，2017

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.2017.11.03

《硅酸盐学报》创刊 60 周年专题论文

太阳能光电、光热转换材料的研究现状与进展

王 聪，代蓓蓓，于佳玉，王 蕾，孙 莹

(北京航空航天大学物理学院太阳能物理实验室，北京 100191)

摘 要：重点探讨了太阳能光电、光热转换技术领域的材料研究现状与发展，主要包括光伏电池半导体材料和太阳光谱选择性吸收涂层光学材料膜系。太阳电池材料的关键问题还是成本与光电转换效率，钙钛矿太阳电池的研究成为光伏电池新的研究热点。太阳光谱选择性吸收涂层是太阳能光热利用领域的核心材料技术之一。近年来，太阳能的中高温热利用，尤其是聚焦热发电技术，作为与光伏发电平行的另一种主流太阳能发电方式，成为人们日益关注的焦点。另外，还阐述了中高温太阳光谱选择性吸收涂层在国内外的研究成果和最新进展。

关键词：太阳能；光伏电池；太阳能聚焦热发电；太阳光谱选择性吸收涂层

中图分类号：TK519　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2017)11–1555–14

网络出版时间：2017–10–09　13:56:00　　**网络出版地址**：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2310.TQ.20171009.1356.014.html

Recent Development and Advance of Solar Photovoltaic Materials and Photothermal Conversion Materials

WANG Cong, *DAI Beibei*, *YU Jiayu*, *WANG Lei*, *SUN Ying*

(Center for Condensed Matter and Material Physics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The research status and advance of solar photovoltaic materials and photothermal conversion materials, which mean semiconductor solar cell materials and solar spectral selective absorbing coatings, were reviewed. The main problems of solar cell materials are cost and photoelectric conversion efficiency (PCE). The investigation of perovskite solar cell becomes a new research hotspot. On the other hand, solar selective absorbing coating is one of the key material technologies of solar thermal utilization. In recent years, medium-high temperature heat utilization of solar energy, especially the technology for concentrated solar power (CSP) as another mainstream of solar energy generation, is becoming a focusing in parallel with photovoltaic power generation. Thus this paper also talks about the research results and recent development of high temperature solar selective absorbing coatings as an important content.

Keywords: solar energy; photovoltaic cell; concentrated solar power; solar selective absorbing coating

太阳能作为一种取之不尽的清洁能源成为人类开发的重要绿色能源之一。太阳能的转化与应用主要分为：光电、光热、光化学(光催化)、光生物能 4 种形式。太阳能光电转换，即光伏发电技术，是利用半导体材料的光生电子效应直接把太阳光能转变为电能的发电方式。目前研究的光伏电池半导体材料包括：硅(单晶、多晶、非晶)电池、无机化合物电池、染料敏化电池、薄膜电池、有机电池、无机-有机杂化太阳电池(如钙钛矿电池)、其他如石墨烯、量子点太阳电池等。至于太阳能光热转换技术，是将太阳辐射能通过集热系统聚集吸收转化为热能，其热能可直接应用，也可进一步经过热传输系统将聚焦收集的高温热能传给热机，由热机转化为机械能，然后带动发电机发电。这种发电方式又称为太阳能聚焦热发电(CSP)。其发电方式与机理完全不同于太阳能光伏发电技术，

收稿日期：2017–06–13。　修订日期：2017–06–23。

基金项目：国家自然科学基金重点项目(51732001)；国家自然科学基金面上项目(51572010)；中央高校基本科研业务费。

第一作者：王 聪(1966—)，男，博士，教授。

Received date: 2017–06–13.　**Revised date:** 2017–06–23.

First author: WANG Cong (1966–), male, Ph.D., Professor.

E-mail: congwang@buaa.edu.cn

但这种聚焦热发电方式与光伏发电一样，成为目前并行的太阳能发电的两种主流方式。太阳能光热转换技术根据其温度与应用可分为 3 个层次：1) 热能低温(≤100 ℃)应用，如热水；2) 热能中温应用(100～240 ℃)，如工业蒸汽、空调、制冷、酿酒、海水淡化等；3) 热能高温应用(≥240 ℃)，即聚焦热发电技术(CSP)。而聚焦热发电技术根据太阳光的聚焦方式又分为槽式、塔式、碟式、菲涅尔 4 种形式。在太阳能应用技术领域，大家普遍关心的关键核心技术包括全光谱光吸收技术、高效能量转换技术、长时段能量存储技术、低成本长寿命系统集成技术。

1 太阳能光电转换材料与技术

太阳能光电转换材料主要指半导体光伏太阳电池，按照材料划分，主要有：

1.1 硅太阳电池

硅太阳电池是当前太阳能发电的主力，它的转换效率为 10%~26%[1]。1961 年，W. Schokley 等在研究硅太阳电池时提出，硅太阳电池在理想状态下转换效率的极限约为 30%[2]。显然，目前硅太阳电池的效率已经接近 Schokley 理论极限。但在实际生产中，硅太阳电池的效率还与 30%有较大差距。为了提高硅太阳电池的效率，通常采用的办法有：从电学上改善硅太阳电池的结构，从而使光子激发出的电子–空穴对更有效地分离到达电极[3]；对太阳电池表面进行优化，增强太阳电池的光吸收[1,4]；将太阳电池光谱响应弱的光上(下)转换成光谱响应强的光；改良太阳电池的封装条件，使更多的光照射到太阳电池上[5]。太阳能电池主要将紫外波段和可见光波段的能量转化为电能，拓展吸收光谱对太阳能电池是十分重要的。制备超薄晶硅电池是降低成本的标志性手段，然而一般的实验室制备超薄晶硅电池厚度罕有低于 20 μm 的。Tan 等制备的超薄晶体硅太阳能电池硅片厚度 16 μm，并且表面金字塔型结构厚度也只有 1~2 μm，而且成本更低[6]。硅太阳电池按照材料硅的结晶状态又可划分为单晶硅、多晶硅和非晶硅电池 3 大类型。

1.1.1 单晶硅太阳电池　　单晶硅是指硅材料整体结晶为单晶形式，是目前普遍使用的光伏发电材料。单晶硅太阳电池是硅基太阳电池中技术最成熟的，相对多晶硅和非晶硅太阳电池，其光电转换效率最高。高效单晶硅电池的生产建立在高质量单晶硅材料和成熟的加工工艺基础上。现有的生产传统晶体硅太阳能电池的工艺需要真空，成本高，工艺复杂且有一定潜在技术风险。Abdullah Uzum 等通过模拟和实验实现了非真空制备晶体硅太阳能电池的工艺[7]。单晶硅太阳电池以纯度高达 99.999%的单晶硅棒为原料，也增高了成本，难以大规模使用。为了节省成本，目前应用的单晶硅太阳电池对材料要求有所放宽，部分采用了半导体器件加工的头尾料以及废次单晶硅材料，或者经过复拉制成太阳电池专用的单晶硅棒。单晶硅片制绒技术更是减少光损失，提高电池效率的有效手段[8]。在晶硅电池的研究中，为了降低成本，重点研究方向包括：一是继续提高光电转换效率；二是用超薄晶硅制作电池以节约材料成本。提高电池的光电转换效率，主要靠单晶硅表面微结构处理、提纯、缺陷控制和掺杂工艺等[9]。文献[10]中通过调控电池背面形貌制造的单晶硅太阳电池效率达 19.27%。目前单晶硅电池的光电总转换效率可以达到 20%~26%。尽管单晶硅电池具有转换效率高，稳定性好的优点，但由于单晶硅生产工艺复杂、加工工艺繁琐、致使单晶硅电池成本居高不下，因此依靠单晶硅大规模推广太阳电池还有一定难度[11]。由 Yang 等报道的无掺杂硅太阳能电池，不仅有 22.1%的高效率，更是拥有良好的稳定性和低廉的制造成本，在工业上提供了更高的可行性[12]。

1.1.2 多晶硅太阳电池　　多晶硅片生产能耗低，生产过程无污染，与单晶硅太阳电池相比，多晶硅太阳电池更加经济。但由于多晶硅内存在明显的晶粒界面，晶格错位等缺陷，其效率还比较低。还有载流子迁移率、寿命和扩散长度等，与单晶硅太阳电池相比，多晶硅太阳电池都低很多。但很有希望的是， Jiang 等报道了效率 18.6%的倒金字塔结构大面积多晶硅太阳电池[13]。在德国弗劳恩霍夫协会科学技术人员的努力下，多晶硅太阳能电池的光电转换率实现了 20.3%的突破[14–15]。多晶硅太阳电池制备的技术关键是结晶工艺。2017 年，P. Bellanger 等通过新的结晶工艺，由铝基底上的非晶硅，经过一系列退火等过程，形成了用于光伏器件的多晶硅片[16]。

1.1.3 非晶硅太阳电池　　非晶硅内原子排列短程有序，长程无序，有大量结构缺陷，因此，普通条件制得的非晶硅不能直接用于太阳电池，大家普遍利用高频辉光放电法、反应溅射法、等离子体化学气相沉积(PECVD)的方法来制备，还可通过氢稀释技术来获得缺陷密度低且稳定性好的非晶硅。非晶

硅太阳电池生产成本低，制备简单，弱光性好，是实用廉价的太阳电池之一。该电池多采用 p-i-n 结构，易于大面积制备。2017 年，Krajangsang 等通过增加 i-a-SiO:H/i-a-Si:H 堆叠式保护层，制备出效率为 19.4%的非晶硅太阳电池[17]。Ferhati 等通过优化中间金属层的新方法有效提高了 p-i-n 型非晶硅(a-Si:H)太阳电池的光吸收性能[18]。限制非晶硅太阳电池发展的主要原因还是光致衰退效应(S-W 效应)，a-Si-H 薄膜在电流或者长时间强光照射下，内部产生缺陷，导致光学性能的变化。造成 S-W 衰退的微观机制目前尚无定论。2009 年就已有 Amartya Chowdhury 等制得纳米晶硅太阳电池，获得的最小衰减效率只有 2%[19]。Hong 等论述了通过透明电极和 p 型半导体层之间的缓冲层来减小太阳能电池的光致衰退现象[20]。

1.2　化合物太阳电池

Ⅲ~Ⅳ族化合物半导体光伏材料如 CdTe、GaAs 等，其禁带宽度在 1.0~1.5 eV，与太阳光谱匹配较好，具有直接带隙且太阳光吸收波段宽而广泛应用于太阳能光伏发电。

1.2.1　砷化镓(GaAs)太阳电池　　自 20 世纪 50 年代砷化镓被发现具有光伏效应，砷化镓太阳电池发展已有 50 多年。一般而言，半导体材料晶格常数越大，能隙越小，例如 III～V 族化合物的能带宽度与晶格常数基本成反比[21]。砷化镓作为典型的 III～V 族化合物，能隙约 1.4 eV，对高温有较强的耐受力，在 200 ℃的光电转换效率变化不大，因此，砷化镓是制备高倍聚光太阳电池的理想材料。20 世纪 80 年代后，砷化镓太阳电池的制备方法从液相外延法(LPE)过渡到金属有机化学气相沉积法(MOCVD)，结构从单结过渡到多结叠层结构。Lin 等报道的单结 GaAs 太阳能电池效率高达 23.52%[22]。与硅基太阳电池相比，砷化镓太阳电池显然具有更高的光电转换效率，且拥有更好的耐高温性能及抗辐射能力[23]，因此，GaAs 材料主要用于空间电池和地面聚光电池。

1.2.2　碲化镉(CdTe)太阳电池　　CdTe 是一种直接带隙半导体，能隙 1.45 eV，太阳光谱响应在最理想的太阳光谱波段，防腐蚀性远远高于硅太阳电池和砷化镓太阳电池，在光伏产业中，有很强的竞争力和广阔的发展前景。但碲化镉(CdTe)太阳电池也存在大的不足之处，其电池性能在光照、湿度、温度、以及所处化学气氛等外界环境中容易发生衰减。因此，它的稳定性是研究的一个重要方面。R. S. Sultana 团队制备的超薄薄膜高效 CdTe 太阳能电池，背部附加电子层 ZnTe，开路电压达 946.51 mV，短路电流 34.40 mA，填充因子 75.72%，效率突破 2015 年报道的实验室最高效率 22.1%[24]，达到了 24.66%[25]。CdTe 和 CIGS 电池还同时被认为是未来实现低成本目标的典型薄膜太阳电池。

1.3　薄膜太阳电池

目前已经投入商业化的薄膜太阳电池，除了硅基太阳电池和碲化镉薄膜太阳电池外，第 3 种便是铜铟镓硒(CIGS)和铜锌硒硫(CZSS)薄膜太阳电池了。2016 年 4 月，国家发展改革委和国家能源局印发了《能源技术革命创新行动计划(2016—2030)》，明确提出大幅度提高铜铟镓硒，碲化镉太阳电池效率是太阳能利用路线 2030 年的重要目标[26]。薄膜电池的优势，首先是减少了材料用量从而降低了成本，其次是相比于传统的硅基太阳能电池，薄膜电池所需的沉积温度更低。

1.3.1　铜铟(镓)硒(CuIn(Ga)Se_2)薄膜电池　　CuIn-(Ga)Se_2 是最重要的多元半导体薄膜光伏材料之一。$CuInSe_2$ 是直接带隙半导体，能隙约 1.04 eV，掺入 Ga 部分替代 In 后，能隙在 1.04~1.70 eV 的范围内连续可调，还可以在膜厚方向调整 Ga 元素掺入的比例，制备梯度带隙半导体，提高光吸收效率。其光电转换效率接近多晶硅太阳电池，受到光伏产业的高度重视。铜铟硒太阳电池(CIS)是 20 世纪 80 年代初由 Boeing 公司开发出来的多晶薄膜电池。CIS 电池以其廉价、高效、接近于单晶硅太阳电池的稳定性和较强的空间抗辐射性。已受到全世界光伏工作者普遍关注。成为本世纪具有前途的太阳电池之一。目前，铜铟硒太阳电池的实验室转换效率超过 20%，大面积集成组件的效率超过 13%。CIS 光伏材料所具有优异的性能吸引着世界众多专家进行研究，但由于其生产技术要求高、工艺重复性差、高效电池成品率低，因此直到 2000 年才初步产业化，但目前已经突破产业化瓶颈。2011 年，德国的 Philip Jackson 团队制备出效率 20.3%的 CuIn(Ga)Se_2 薄膜电池[27]。M. Moradi 团队利用 ZnSe 缓冲层制备的 CIGS 薄膜电池效率 20.07%[28]。M. Asaduzzaman 等报道的 CIGS 高效太阳能电池效率更是达到 24.27%，吸收层带隙 1.21 eV，开路电压 0.856 V，短路电流密度 33.09 mA/cm^2，影响因子为 85.73%[29]。CuIn(Ga)Se_2 薄膜电池生产成本较低，主要通过共蒸发法和硒化法进行制备，也可通过调节 Cu 和 In 的比例调节成 P 型或 N 型[30]。尤其是，$CuInSe_2$ 薄膜

电池具有很强的耐辐射性，放射线辐照下几乎没有性能衰减，寿命极长[31–33]，其发展前景良好。

1.3.2 铜锌锡硫(CZTS)薄膜太阳电池 由于 $CuIn(Ga)Se_2$ 中 In 和 Ga 元素都比较昂贵稀有，人们开始使用更为廉价的铜锌硒硫(CZSS)来替代这种材料，但效率仅有 0.66%[34]，但它成功为新型薄膜太阳能材料铜锌锡硫(CZTS)打开了大门。CZTS 的 Shockley-Queisser 理论效率可以达到 32.2%[35]。CZTS 微观上是锌黄锡矿结构，属于 p 型半导体，它的光伏性质是由 Ito 和 Nakazaw 首先发现的[36]。1997 年，Friedlmeier 团队又制备出效率为 2.3%的电池元件[37]。之后电池效率一直提升缓慢。2014 年，Wang 等使用少量 Se 元素替代 S 元素，制备的 CZT(S,Se)薄膜太阳能电池效率已经提高到 12.6%[38]，是目前所达到的最高效率。

1.4 染料敏化太阳电池(DSSC)

染料敏化 TiO_2 电池实际是一种光电化学电池。早期的 TiO_2 光电化学电池稳定性差、效率低。1991 年瑞士 Grätzel 将染料敏化引入该种电池，效率达到 7.1%，成为太阳电池前沿热点之一[39]。目前这种电池的实验室效率达到 11%。有时又称纳米晶太阳电池，采用的是无机-有机复合体系，有效地把纳米技术与太阳电池结合。首先采用无机纳米粒子制备多孔的薄膜，然后在薄膜的微孔中修饰有机染料分子或无机半导体粒子作为光敏剂，光敏剂吸收入射光后产生电子-空穴对。通过半导体颗粒使电荷转换效率提高。其制备工艺简单，制作成本仅为单晶硅电池的 1/5[9]，具有明显的价格优势，但仍需要克服光电转换效率低和耐久性差等问题。

2011 年，孟庆波等总结了一系列提高染料敏化太阳电池效率的方案，如提高光电子收集和传输效率、开发新型染料、开发固态以及准固态电解质等等。值得提及的是，在染料敏化太阳电池的敏化剂中引入窄禁带无机半导体量子点(QD)，发展成为量子点敏化太阳电池，也有很好的前景和表现[40]。Chen 等报道的高效染料敏化太阳电池效率为 8.18%，开路电压为 715 mV，短路电流 15.814 mA/cm^2，填充因子 72.4%[41]。通过 20 多年的研究，目前，染料敏化太阳电池的最高效率已经达到 13%[42–43]。总之，以纳米 TiO_2 为主的薄膜太阳电池，因其工作原理独特，生产成本低廉而受到广泛关注。

1.5 有机太阳电池

有机太阳电池其实是薄膜太阳能电池的另外一种类型。原料丰富，成本低，可弯曲，质量小，如果可以提升光电转换效率将大有发展。提高电池效率的主要方法有界面修饰，优化电池结构，改良活性层材料等等。经过 30 年的发展历程，有机太阳电池效率突破 10%，我国取得的进展不容忽视。中科院葛子义课题组合成的高效单结正型有机太阳电池效率高达 10.02%[44]。中科院 Zheng 等制备的无富勒烯有机太阳电池效率超过 11%[45]。中国科学院国家纳米科学中心与西安交通大学合作，成功制备出一种可溶性有机小分子光伏材料，并通过改善活性层形貌，将电池的光电转换效率提升至 11.3%，这也是目前有机太阳电池的最高效率之一[46]。还有有机小分子太阳能光伏材料，其具有重量轻、低成本、化学稳定性好且制备方便等优势，但其迁移率较低。针对于此， Guo 等对一种单相、高空穴迁移率的有机太阳电池进行了报道[47]。提高有机小分子光电材料的转换效率是研究的重点。张昱等[48]成功设计并制备了结构为 D-π-A-π-D 有机小分子光伏材料，获得了较高的光电转换效率[15]。

富勒烯 C_{60} 是一种完全由 C 原子组成的球状物质，是由 Kroto 等[49]发现的单质碳的第 3 种同素异形体。C_{60} 以其独特的材料结构和性能受到广泛关注，C_{60} 独特的材料结构使其具有 8~14 nm 的电子扩散距离，其特殊的电学特性使电荷的传输更方便，同时也提高了电荷收集率，所以相对其他有机光伏材料，C_{60} 的电荷引出效率更高。C_{60} 衍生物纳米材料有较好的稳定性、柔性、超导性，在光照条件下光电转换性能优良，稳定性和延展性也非常好，因此越来越多地被应用于有机太阳电池中，极具发展潜力。

聚合物/富勒烯太阳电池最早出现在 1959 年。Kallmann 等制备出的第一个单一活性层结构的聚合物/富勒烯太阳电池，其效率仅有 0.1%[50]。相比硅系、无机化合物光伏材料，聚合物/富勒烯太阳电池(PFSC)因其重量较轻、工艺设备简单、成本低廉、优异的光电转换性和易于生产大面积柔性器件等鲜明优势，从而受到科研人员和工业生产的高度关注。其电池效率最初虽然很低，但目前也已被提升至 10%以上[51]。之后聚合物/富勒烯太阳电池的结构又经历了双层平面结构和本体异质结结构的演变。在太阳光照射条件下，这些 C_{60} 衍生物纳米材料具有优异的光电转换性质、较好的热稳定性和理想的延展性。C_{60} 及其衍生物太阳能光伏材料已成为新一代具有巨大发展潜力的光伏发电材料。然而 C_{60} 及衍生物在可见-近红外光区光子吸收率低下，应用

于受体材料器件时必须增强材料自身对太阳光的吸收率。

1.6　钙钛矿太阳电池

钙钛矿在这里是指一种晶体结构类型，不是传统的具有 ABO_3 晶体结构的钛酸钙($CaTiO_3$)，而是具有相同晶体结构钙钛矿型 ABX_3 的一种无机-有机杂化化合物。

A 一般为有机阳离子，如甲胺阳离子 $CH_3NH_3^+$，甲脒阳离子 $CH(NH_2)_2^+$，在钙钛矿太阳电池无机化的过程中，还有人尝试用其他金属阳离子对有机部分进行替代。Luo 等第一次在大气中用铯离子 Cs^+ 替代有机阳离子制得稳定的无机钙钛矿 $CsPbI_3$ 电池，效率 1.88%[52]。B 一般为 2 价金属阳离子，最常用的是 Pb^{2+}，但由于铅元素有毒，对环境造成一定的威胁，尝试用其他元素如 Ge^{2+},Sn^{2+}[53]等对其进行全部或部分替代。X 一般为卤素离子。

杂化钙钛矿太阳电池的光电转换效率表现出了其他太阳电池不曾有过的增长速度，并且还在呈现上升趋势[54]。这类材料也属于直接带隙半导体，拥有更丰富的导带价带能级，能带可调控，与砷化镓等材料相比，可见光吸收系数更高[55]，吸收范围更宽，典型的 $CH_3NH_3PbI_3$，光吸收范围覆盖整个可见光波段，在钙钛矿太阳电池中一般作为吸光层存在。难得的是，此类钙钛矿的载流子寿命及迁移率都非常高，使得空穴和电子的扩散距离非常大，对于制造光伏器件具有很大的优势。自 2009 年 Akihiro Kojima 首次在染料敏化太阳电池中使用钙钛矿结构有机卤化物 $CH_3NH_3PbI_3$ 和 $CH_3NH_3PbBr_3$ 时，作为光吸收层制备出第一个钙钛矿太阳电池，并获得 3.81%的光电转换效率[56]，Ming 制备了无机-无铅钙钛矿太阳能电池材料 $CsGeI_3$，其性质会显著降低开路电压，而由于它很小的空穴有效质量，可用来作为有效的空穴传输层[57]。截至 2016 年，经过认证的钙钛矿太阳电池的光电转换效率已经高达 22.1%[58]。钙钛矿太阳能光伏材料不仅具有良好的吸光性和电荷传输速率，而且还能通过不同的结构提升其光电转化效率[59]。钙钛矿太阳能光伏材料主要包括钙钛矿吸光材料、空穴传输材料、电子传输材料。钙钛矿吸光材料实质上是一种有机-无机的杂化材料，钙钛矿太阳光伏材料在快速发展的同时也存在一些亟需突破的问题，如何在提高稳定性的同时还具有较高转换效率是目前的一个难点。

钙钛矿材料成膜方法非常简单，最常用的是传统溶液法。传统溶液法包括一步溶液法和二步溶液法。其他还有气相沉积法，分步液浸法等。

1) 一步溶液法：一步溶液法是最简单的制备方法，通常将摩尔比例为 1:1 的 AX 和 BX2 溶解于 γ-丁内脂(GBL)或 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)等有机溶剂中，配置成前驱体溶液，旋涂于衬底上即可。但成膜条件对一步溶液法影响较大，在形貌控制上有一定难度，成膜质量不高。

2) 二步溶液法：二步溶液法(又叫相互扩散法)，由黄劲松等提出[60]。先将 BX_2 旋涂于衬底上，之后再悬涂 AX，让两层反应物在退火的过程中进行相互扩散并发生反应。二步溶液法制备的 ABX_3 钙钛矿吸光层，纯度更高，成膜质量更好，更致密，相对于一步法，有效增加了电子-空穴对产生数量，减少层内复合，提升了光电转换效率。

3) 气相沉积法：Snaith 首先运用气相沉积法制备钙钛矿吸光层[61]。用氯化铅(PbCl)与 CH_3NH_3I 在真空中混蒸，获得效率为 15.4%的均匀平整的钙钛矿薄膜。但因为制备过程需要在真空中进行，成本高而且无法大面积制备。

4) 分步液浸法：分步液浸法的优点在于可控性和重复性都很好。Grätzel 等先在 TiO_2 薄膜上旋涂一层 PbI_2，干燥后浸没在 CH_3NH_3I 溶液中，充分反应后用异丙醇冲洗掉多余 CH_3NH_3I 溶液，制得钙钛矿薄膜[62]。分步液浸法将介孔结构钙钛矿太阳电池的效率提升到了 15%以上。

目前首先亟待解决的是钙钛矿材料的稳定性问题。钙钛矿材料的热稳定性、湿度稳定性都非常差，甚至有些钙钛矿材料遇光也会分解，为钙钛矿太阳电池的制备带来很大困难。Bi 等报道了将脂肪族含氟两亲性添加剂加入 $CH_3NH_3PbI_3$ 的方法，来调节形貌和提高钙钛矿材料的环境稳定性[63]。复旦大学的 Liang 等通过引入有机阳离子基团，将 3D 结构的 $MAPbI_3$ 变成 2D 结构，发现 iso-Ba^+显著改善了电池的稳定性，无需封装即可在 20 ℃、湿度 60%的环境中坚持 840 h 并且光吸收系数没有明显变化[64]。文献[5]中制备的超稳定 $(HOOC(CH_2)_4NH_3)_2PbI_4$/$CH_3NH_3PbI_3$ 钙钛矿太阳电池不仅有 11.2%的输出效率，并且持续工作超过 10 000 h。Song 等制备的高稳定性钙钛矿太阳能电池在潮湿空气中仍表现出长期稳定性[66]。J. K. Nam 报道全无机铯卤钙钛矿太阳能电池，空气中稳定性良好[67]。另外，毒性 Pb 元素的替代也是目前研究的热点之一。绿色环保是当今社会发展的主流趋势。常用的方法

就是其它元素替代。目前用 Sn 元素替代 Pb 元素的方法相对成熟，但是替代后的钙钛矿材料更加不稳定。钙钛矿材料生产工艺简单而且廉价，但制作钙钛矿太阳电池的过程对环境的要求较高，空穴传输层材料的价格也非常昂贵，大大增加了电池的制造成本。

1.7 其它

1.7.1 石墨烯 石墨烯是一种完全由碳原子以 *sp* 杂化方式形成的只有 1 个原子层厚度的准二维蜂窝状平面薄膜材料，价格低廉，轻薄但是韧性强，透光度高，被广泛应用于太阳电池领域，如代替导电玻璃作为太阳电池的透光电极，作为电池受体材料等[68]。P. S. Chandrasekhar 等在钙钛矿太阳电池的一项研究中发现，用石墨烯/ZnO 作为电子传输层的钙钛矿太阳电池，比单用 ZnO 作为电子传输层的光电性能好得多，短路电流密度从 15.54 mA/cm^2 提高到了 19.97 mA/cm^2，光电转换效率从 7.0%提升至 10.3%[69]。

1.7.2 量子点太阳电池 量子点太阳电池是目前最前沿的太阳电池之一，理论上可将光电转换效率提高到 44%[70]。Du 团队制备出得到认证的量子点太阳电池效率为 11.6%[71]，仍有很大提升空间。此外，量子点太阳电池还存在对电极与电解质反应和液态电解质泄露等情况，直接缩短了量子点太阳电池的使用寿命。

2016 年，Abhishek Swarnkar 报道了 α-$CsPbI_3$ 钙钛矿制成量子点，发现不仅有理想的禁带宽度，而且在大气下相稳定保持了几个月，高温下仍能保持稳定，电子输运距离较长，开路电压达 1.23 V，效率 10.77%[72]。Gyea Young Kwak 制备出了效率为 14.98%的 Si 量子点太阳电池[73]。张敏等报道了利用 Cu_2ZnSnS_4 纳米片阵列对电极的量子点敏化太阳电池，效率 0.80%，而以 Pt 作为对电极的量子点敏化太阳电池效率只有 0.34%[74]。

2 太阳能光热转换材料与技术

2.1 太阳能光热转换材料的研究现状

众所周知，太阳能是一种宽光谱、低强度，间歇性的能源。要实现太阳辐射能的高效热利用，必须借助聚焦系统和集热器将光能高效转化为热能，其作用是靠集热器中特殊的物质结构与材料体系实现其光谱选择性吸收功能。因此，在太阳能光热转换与应用领域，太阳光谱选择性吸收涂层是太阳能光热转换关键器件-集热器(集热管或集热平板)的关键材料技术，是太阳能材料研究领域的又一研究热点。为了提高太阳能光热转化效率，太阳光谱选择性吸收涂层要求在太阳辐射光谱 300 nm~2.5 μm 范围其表面具有高的吸收率，例如 $\alpha \geqslant 0.95$；在主要热辐射范围 2.5 ~30 μm 具有尽量低的法向红外辐射率，例如 $\varepsilon \leqslant 0.07$ (80 ℃)。因此这种材料本质上是一种光学多层膜。近十几年来，光谱选择性吸收涂层在太阳能的中低温应用方面得到了迅速发展，其在太阳能热水器方面的应用已经实现商业化，被广泛应用在家庭或居住区的热水供应系统中。但是太阳光谱选择性吸收涂层在太阳能中高温应用领域(如聚焦热发电、制冷等)却存在着严重的瓶颈。太阳能聚焦热发电技术要求耐高温、长寿命、低成本的太阳光谱选择性吸收涂层的研制与商业化开发。

另一方面，光谱选择性表面的研究，除了用于光热转换的光谱选择性吸收涂层之外，还包括光谱选择性透射、光谱选择性反射、光谱选择性辐射表面等。其应用领域也更为广泛，如在光伏电池、集热器、聚光反射镜、太阳房、温室、节能、热电材料、辐射致冷、清洁能源制造和环境净化方面均具有重要而迫切的需求；而且在国家重大战略需求，如光学材料(减反/增透、透明导电膜、滤光片)、智能窗、节能器、节能建筑、汽车、雷达-红外-激光-可见光隐身材料、卫星、航天器、空间站等领域同样具有重要的应用价值。由此可见，耐高温、长寿命、高效光热转换的太阳光谱选择性吸收表面材料的研究，在太阳能及其相关领域具有更为广阔的应用空间，因此其基础研究和技术开发均十分重要。

理想的太阳光谱选择性吸收涂层应具备在太阳光谱 350~2 500 nm 区具有最大的吸收率，而为了减少吸收表面的热辐射损失，同时必须具备在 2 500 nm 以上具有最小的热辐射率。光谱选择性吸收涂层的概念最早由以色列科学家 H. TaBor[75]在 20 世纪 50 年代提出。90 年代初，澳大利亚悉尼大学 Zhang[76] 根据等效媒质理论在理论模拟和实验的基础上，提出了双层干涉加吸收的大三层结构的金属陶瓷多层膜设计思想，目标在于吸收所有的太阳辐射能，而抑制主要的红外热辐射，以便达到吸热、保温的作用。等效媒质理论认为，当一种材料微粒均匀镶嵌在另一种基体材料中构成的复合材料宏观均匀一致时，材料的介电性能可用一种均匀材料的介电性能来等效，而这种材料的介电常数就是所研究的非均匀材料的等效介电常数。Zhang 的设计思路是根据

已有的介质的复折射率和金属的复折射率，运用等效媒质理论求出一定金属体积比的复合材料的复折射率，再优化计算所选择的干涉-吸收选择性吸收涂层的吸收率和反射率。这一设计思想强调和利用了双吸收层间合理的成分和厚度设计而形成的对入射光的干涉，表现为太阳光反射谱中出现明显的干涉峰，不仅弥补甚至提高了由于金属体积份数相对降低和薄膜厚度下降而带来的吸收比的下降，相反金属体积份数的降低和干涉相消，抑制了高温热发射率的升高，同时形成了比较陡峭的吸收限。干涉现象的利用，使人们对太阳光谱吸收机理和涂层结构设计由原来的逐层透射吸收而逐渐转变为除利用纳米粒子的本征吸收外，进一步通过增强干涉相消而带来吸收率的提高，这使选择性吸收薄膜的成分和结构都更具可设计性。在理论上，除了等效媒质理论，还相继发展了 Maxwell Garnett(MG)理论、Bruggeman(BR)理论、微分等效媒质理论(DEM)和 PingSheng(PS)理论等。其中 MG 理论和 BR 理论应用较多，它是研究复合材料介电性能的理论基础。MG 理论对于金属填充因子较低时(f<0.3)与实验结果吻合较好，而在更高的填充因子下，BR 理论吻合得更好。根据所选材料的光学常数，利用等效媒质理论计算出不同金属填充因子下复合单层膜等效介电常数，再从 Maxwell 关系式推演出它们的光学常数、折射率 n 和消光系数 k，依据各单层膜的光学常数，利用矩阵法对这些复合膜构成的各种膜系结构进行优化计算。

根据涂层结构和吸收机理的不同，可以将太阳光谱选择性吸收涂层大致分为以下几类：本征吸收型、半导体-金属串联型、表面微不平型、多层膜干涉型、金属-电介质复合型[77]。金属-电介质复合型或其中的金属陶瓷复合型涂层是在电介质基体中嵌入微小的金属粒子形成的复合材料。由于金属陶瓷的带间吸收和小颗粒共振使得涂层对可见光和近红外光有更强烈的吸收作用[78]，其中研究最多、应用最广泛的是多层渐变金属陶瓷膜和双干涉吸收膜系。近年来多层渐变金属陶瓷涂层被广泛报道，如：使用 Mo、Ag、Cu 和 Ni 等作为金属层和使用 Al_2O_3、SiO_2、CeO_2 和 ZnS 等作为电介质层的多层膜结构吸收涂层已经被证实适合高温环境下使用。Zhang Q.C. 提出的双层干涉加吸收的大三层吸收涂层从基底到表面由四部分组成，分别为：红外反射金属层、高的金属体积份数吸收层(HMVF)、低的金属体积份数吸收层(LMVF)和减反射层[79]。这种双层吸收结构的涂层比同类渐变的金属陶瓷吸收层具有更加优良的光谱选择吸收性，原因是太阳辐射不仅被金属陶瓷基体吸收，而且涂层中两金属陶瓷吸收层会产生相互干涉效应，使得太阳光辐射被进一步吸收。另外，由于金属陶瓷双吸收层具有卓越的高温稳定性和优良的光谱选择性，使其成为目前光谱选择性吸收涂层的主流研究方向。这种涂层的研究可以借助计算机辅助光学软件，很快计算出备选材料的光学性质，对涂层材料进行模拟和优化，从而模拟获得最佳的涂层结构、光学参数和理想光学性能的多层膜结构涂层[80–81]。涂层的光谱选择性还可以通过调节涂层成分、涂层厚度、金属颗粒浓度、颗粒尺寸、颗粒形状和颗粒取向等来优化[82]，还可以选择适合的减反射层和基底来提高涂层的光谱选择性和热稳定性。太阳光谱选择性吸收涂层的制备方法可分成物理和化学方法两大类，包括：物理气相沉积[83–85]、化学气相沉积[86–87]、电镀法[88–89]和湿化学合成法[90–91]等。但目前主流应用的是磁控溅射物理气相沉积法。

在上述理论指导下，为寻找适合中高温下使用的太阳能选择性吸收涂层，近年来国内外研究了大量金属陶瓷双层干涉吸收涂层系列，主要采用 Al_2O_3 为介质基体材料，其中具有代表性的膜系有 Ni-Al_2O_3、Co-Al_2O_3、Pt-Al_2O_3、Mo-Al_2O_3 以及 Fe-Al_2O_3 等，以 Al_2O_3 为基体的金属陶瓷膜特点在于热稳定性强、光学性能优异。Lanxner 等[92]研制的 Mo–Al_2O_3 涂层，其 α=0.95，ε=0.18(350 ℃)，在真空中 450~500 ℃工作温度下光学性能稳定。该涂层作为 Luz 公司热发电用聚光式真空集热管的选择性吸收表面，80 年代末已实现商业化批量生产，虽然该涂层热稳定性较好、光学性能优良，但由于制备过程采用射频溅射技术，相对直流溅射技术而言，其设备复杂、生产效率低，给推广应用带来一定困难。Zhang 等以 AlN、Al_2O_3 为介质材料，相继研究了 Mo-AlN、Mo-Al_2O_3、Al-AlN、SS(不锈钢)-AlN、W-AlN 和 W-AlON 等一系列吸收膜体系。近几年来，M. Farooq 等[93–94]对 Ni-SiO_2 涂层、V. Teixeira 等[95–96]对 Cr-Cr_2O_3-CrO_3 涂层、C. Nunes 等[97–98]对 Ti-TiN_xO_y 涂层、S. Suzer 等[99]对 Ni-Al_2O_3 涂层以及 Andreas Schuler 等[100–101]对 Ti-α-C：H 涂层等选择性吸收涂层进行了研究。国内自 20 世纪 80 年代以来，对太阳光谱选择性吸收涂层的研究以清华大学最多，如殷志强史月艳等[102–103]研究了 Al_xO_y-AlN/Al_xO_y-AlN-Al/Al (α=0.94，ε=0.07)等系列薄膜。另外，北京市太阳能

研究所谢光明、于凤琴等[104]研制了 Al-N-O 渐变型选择吸收涂层；中国科学院广州能源研究所陈德明、徐刚等[105]对 TiN_xO_y 系列涂层也做了大量研究工作且卓有成效。至今报道的太阳光谱选择性吸收薄膜已达到的光学性能如下[78]：在太阳辐射光谱 300 nm~ 2.5 μm 范围其表面具有吸收率 $\alpha \geqslant 0.95$；在主要热辐射范围 2.5 ~30 μm 具有低的法向红外辐射率 $\varepsilon \leqslant 0.06$(80 ℃)，在 400 ℃的辐射率约 0.10 左右。但是，这些涂层体系主要针对中低温集热管和槽式热发电真空集热管的光学性能要求而开展研究，仍然满足不了太阳能中高温热利用、尤其是热发电产业化的更高要求，如塔式集热器的吸热涂层，菲涅尔聚焦裸管的吸热涂层等，需要更高的耐温性与耐候性，我们必须从更基本的材料研究出发重新审视这一需求。

2.2 中高温光谱选择性吸收涂层的研究进展

耐温性一直是中高温光谱选择性吸收涂层的主要问题。槽式聚焦热发电技术所需真空集热管中的光谱选择性吸收涂层需要在真空条件下至少耐温 400 ℃以上。塔式吸热器承受的温度更高，可高于 1 000 ℃以上，且在大气环境中使用，除耐高温外，其材料还需耐高温氧化、耐腐蚀等。目前用于塔式热发电工程的吸热器材料仍依赖于进口。另一方面，除槽式和塔式聚焦热发电之外，菲涅尔式聚焦热发电形式所用的集热管是非真空集热管，其材料虽然无需耐高温，但耐候性的问题十分严重，由于我国太阳能应用地域恶劣的环境因素，其耐盐雾、耐潮湿、耐腐蚀、耐氧化的问题十分突出。多年来人们对中高温光谱选择性吸收涂层进行了广泛而深入研究工作，在材料体系和制备工艺方面取得了一系列的研究成果。本文仅介绍近几年的中高温光谱选择性吸收涂层研究成果，并进行简要评述。

2006 年，Barshilia 等[106–107]报道了 TiAlN/TiAlON/Si_3N_4 体系的太阳能吸热涂层，吸收率 α=0.95，发射率 ε=0.07。该涂层在空气中较高温度(600 ℃)下热处理，性能几乎不变。随后他们又报道了 NbAlN/NbAlON/Si_3N_4 体系的吸热涂层，吸收率 α=0.956，发射率 ε=0.07。在空气中 450 ℃热处理 160 h，光学性能未发生明显变化，表现出良好的热稳定性。2012 年，Barshilia 在 Solar Energy Materials & Solar Cells[78]综述了近年来国际上太阳光谱选择性吸收膜系的研究。Cao 等[108–110]报道了 W-Ni-Al_2O_3 金属陶瓷多层膜，这一体系以 W 做红外反射层和阻挡层，不同金属体积份数的 W-Ni-Al_2O_3 双层为吸收层，Al_2O_3 和 SiO_2 为双减反层。这个涂层在真空 600 ℃、168 h 条件下光学性能稳定，涂层在 500 ℃测得的吸收率为 0.90，发射率为 0.15。后来他们又以 Y_2O_3 稳定的 ZrO_2(YSZ)金属陶瓷为基体，不同金属体积份数的 W-Ni-YSZ 双层为吸收层，YSZ 和 SiO_2 为双减反层，获得在真空 600 ℃、168 h 条件下性能稳定，涂层在 500 ℃测得的吸收率为 0.91，发射率为 0.13，性能比 W-Ni-Al_2O_3 为基体的涂层更好，而且 YSZ 比 Al_2O_3 沉积速率更快。这个工作的亮点是涂层的吸收率和发射率均是在实际工作温度下测得的。随后他们又在铝酸镧基底上，制备了两种不同 TiN 体积份数的 TiN-SiO_2 金属陶瓷，以 W 为红外反射层，SiO_2 为减反层，涂层在真空 700 ℃、168 h 条件下吸收率从 0.95 降到 0.94，发射率从 0.04 升到 0.08，涂层高温热稳定性表现良好。Moon 等[111]设计了一种新的制备光谱选择性涂层的方法，他们用电火花腐蚀、有机溶剂溶解、超声处理、滴落涂布和干燥退火等过程在不锈钢基底上制备了多纳米尺度的 $Si_{0.8}Ge_{0.2}$ 涂层，这种涂层结合了本征吸收、表面微不平吸收和金属-电介质复合吸收 3 种吸收类型，吸收率为 0.90~0.95，发射率低于 0.30 (500 ℃)。这个报道的最大亮点在于涂层制备方法简单而且成本低廉，在太阳能集热发电方面存在很大应用潜力。L. Rebouta 等[112]在前人研究 W-Al_2O_3[113–115]的基础上，采用磁控溅射方法制备了分别以双层 Al_2O_3:W (不同 W 含量)金属陶瓷和 AlSiN/AlSiON 为双吸收层的多层膜结构，以不锈钢为基底，W 为红外反射层，Al_2O_3、SiO_2 或 $AlSiO_x$ 为减反层，制备的涂层吸收率为 0.93~0.95，发射率为 0.07~0.10(400 ℃)；且涂层在空气中 400 ℃、2 500 h 和真空中 580 ℃、850 h 条件下光学性能没有发生明显变化。Zou 等[116]采用电弧离子镀技术制备了 Cr/AlCrSiN/AlCrSiON/AlCrO 涂层，其吸收率为 0.96，发射率为 0.14，空气中 600 ℃、600 h 条件下吸收率降到 0.92，发射率升到 0.16，因此，涂层显示了良好的光学性能和高温热稳定性。作者所在的课题组开发了一系列过渡金属氧化物和氮氧化物光谱选择性吸收涂层，如在《硅酸盐学报》上报道了 NiAlN/NiAlON/SiO_2 新型涂层体系[117]，其吸收率为 0.94，发射率 0.09(80 ℃)；另外，我们报道的 TiZrN/TiZrON/SiON 涂层体系[118]，其吸收率 0.95，发射率 0.08(80 ℃)，真空 500 ℃、300 h 光学性能稳定；报道的 NbMoN/NbMoON/SiO_2 体系[119]，其吸收率 0.95，发射率 0.05(80 ℃)，真空 400 ℃

性能稳定；报道的 NbTiSiN/ NbTiSiON/SiO_2 涂层体系[120]，其吸收率 0.93，发射率 0.12(25 ℃)，真空 550 ℃、100 h 下性能稳定；报道的 ZrSiN/ZrSiON/SiO_2 体系[121]，其吸收率 0.94，发射率 0.06(25 ℃)，真空 500 ℃、500 h 条件下其吸收率保持不变，发射率微升到 0.12。因此，这些新开发的涂层体系在太阳能中高温应用领域存在巨大应用潜力。S. Wu 等[122]将不锈钢(SS304)基底在空气中进行高温热处理，便生成简单的 Fe_2O_3 涂层，该单层涂层在 900~1 000 ℃，2 h 条件下光学性能稳定，吸收率为 0.91~0.92，发射率为 0.18~0.38。虽然涂层的发射率有些高，但是这种涂层成本低廉，工艺简单，可大面积加工生产，因此很有潜力成为太阳能高温应用的光谱选择性吸收涂层。高祥虎等[123–125]在不锈钢基底上设计的 Al_2O_3(L)-WC/ Al_2O_3(H)-WC/Al_2O_3 膜系实现了全陶瓷涂层，吸收率 0.94，发射率 0.08，真空 600 ℃，5 h 条件下光学性能稳定；他们研究的 TiC-WC/Al_2O_3 涂层，吸收率 0.92，发射率 0.11，真空 500 ℃、100 h 条件下光学性能稳定。北京有色金属研究院郝雷等[126–129]采用多弧离子镀在抛光不锈钢和铜基底上制备了 TiAl/TiAlN/TiAlON/TiAlO 涂层，吸收率大于 0.90，发射率为 0.09~0.19，涂层在空气中 800 ℃耐高温氧化。随后他们又报道了 $Ti_{0.5}Al_{0.5}N/Ti_{0.25}Al_{0.75}N$/AlN 涂层体系，该涂层体系同样具有优良的光谱选择性和热稳定性。近年来他们还探讨了类“三明治”结构涂层 Si_3N_4/Cr-CrN_x/ Si_3N_4 的盐雾腐蚀机理，他们选用 Al 基底为红外反射层，经实验证明涂层具有良好的抗腐蚀性，为沿海等高盐地区的太阳能吸收涂层应用提供了实验依据。Feng 等[130–131]报道了 TiAlN/TiAlSiN/Si_3N_4 涂层，其吸收率为 0.94，发射率为 0.10，空气中 600 ℃、2 h 光学性能稳定。随后他们又报道了 TiN/TiSiN/SiN 涂层，并比较了有 Cu 和没有 Cu 做红外反射层的区别，涂层吸收率 0.95，发射率 0.04~0.10(70 ℃)，真空 700 ℃、2 h 条件下光学性能稳定，具有好的光谱选择性和热稳定性。曹鸿涛课题组[132–133]报道了 CrN_xO_y/SiO_2 涂层体系，吸收率为 0.95，发射率为 0.05(80 ℃)，在空气中 278 ℃、300 h 条件下其光学性能稳定。随后他们又报道了 W/Al_2O_3/WTi-Al_2O_3/Al_2O_3 涂层，吸收率为 0.93，发射率为 0.10 (500 ℃)，真空状态下 600 ℃、840 h 光学性能稳定，这些结果对太阳能高温热应用具有重要参考价值。王健等[134–135]报道了 Mo/Mo–SiO_2/SiO_2 涂层体系，吸收率为 0.95，发射率为 0.10，在真空、800 ℃条件下光学性质基本不变。随后他们又通过模拟计算设计了基于 Mo 二维表面光栅的高温太阳光谱选择性吸收表面，经过结构优化的 Mo 表面，法向吸收率为 0.94，法向辐射率为 0.07 (50 ℃)和 0.18 (100 ℃)，有望用于高温太阳光谱选择性吸收表面。Yang 等[136]以 Cu 为红外反射层，在石英基底上溅射了彩色的 Ti/SiO_2/Ti/TiO_2/SiO_2 涂层。涂层显示了好的光谱选择性，吸收率高于 0.95，发射率低于 0.09(80 ℃)。涂层在真空 500 ℃、空气 400 ℃条件下光学性能稳定，为光谱选择性吸收涂层的彩色设计和制备提供了依据。

3　存在的问题与展望

太阳能的应用，存在的主要问题在于能量转换效率、成本、寿命以及储能的难题。围绕此实际问题，作为关键点的材料技术也主要围绕能量转换效率，制备成本和工作寿命展开新材料的探索与开发，同时解决储能的难题。太阳能光伏电池一方面需要进一步提高光电转换效率，同时需要继续降低电池制备成本，并提高电池工作寿命。制作太阳电池的材料要满足如下要求[15]：半导体材料的禁带不能太宽；高的光电转换效率；材料对环境不造成污染；便于工业化生产且性能稳定。目前钙钛矿太阳电池的研究成为热点，但稳定性成为其应用的重要障碍。从长远来说，薄膜太阳电池也许将更有生命力，但需要探索开发新的材料体系和更为简单、环保的制备方法。另一方面，作为太阳能光热转换关键材料技术的光谱选择性吸收涂层同样存在如下问题：1) 耐温性；2) 耐候性；3) 工作寿命；4) 高温下的红外辐射；5) 大面积涂层的制备工艺、成本与设备等。因此，研究新型太阳光谱选择性吸收涂层需要从以下几个方面考虑：1) 探索新材料，新膜系以提高涂层耐温性、耐候性；2) 简化涂层制备方法与工艺，降低制备成本；3) 探索新的光热转换机制以彻底改变光热转换方式；4) 探讨涂层的退化机制，提高涂层工作寿命，建立科学的寿命评估方法。另外，考虑到光热电/建筑美观一体化的需要，光谱选择性吸收涂层的色彩调控也成为近几年来研究的热点之一。总的来说，寻找一种制备简单、成本低廉且在高温、大气环境中长期工作的高吸收涂层是这个领域的普遍诉求。

全球光伏发电已进入规模化发展新阶段，太阳能热利用也正在形成多元化应用格局。太阳能在解决能源可及性和能源结构调整方面均有独特优势，将在全球范围得到更广泛的应用[137]。2016 年 12 月，

国家能源局发布的《太阳能发展“十三五”规划》提出，到 2020 年年底，太阳能装机 1.1 亿 kW，其中，光伏发电装机将达到 1.05 亿 kW 以上，太阳能热发电装机将达到 500 万 kW，太阳能热利用集热面积将达到 8 亿 m^2，太阳能年利用量计划达到 1.4 亿 t 标准煤以上[137]。2016 年 9 月，国家能源局发布了《关于建设太阳能热发电示范项目的通知》，确定第一批太阳能热发电示范项目共 20 个，其中塔式 9 个，槽式 7 个，总计装机容量 134.9 万 kW。这将进一步促进太阳能材料广泛、深入的研究，并有可能出现新的太阳能应用技术与概念，甚或导致颠覆性的材料技术出现。比如科学家正在研制一种新式太阳电池，通过使用碳纳米管和 DNA 等材料，该电池能像植物体内天然的光合作用系统一样进行自我修复，从而延长电池寿命并减少制造成本。新发现的二钌富瓦烯可以吸收阳光并保持半稳定状态；通过催化剂改变形态后，所吸收的太阳能又会释放出来，可称为热电池[138]。

参考文献:

[1] 王晓宇, 李华芳, 王金良, 等. 利用铜纳米颗粒提高太阳能电池效率 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(4): 490–494.
WANG Xiaoyu, LI Huafang, WANG Jinliang, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(4): 490–494.

[2] SHOCKLEY W, QUEISSER H J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells [J]. J Appl Phys, 1961, 32(3): 510–519.

[3] MEKEMECHE A, BEGHDAD M, BELARBI M, et al. Two dimensional device simulation and performance optimization of n-type silicon solar cell structure using PC2D [J]. Sol Energy, 2017, 146: 119–124.

[4] 蒋玉荣, 秦瑞平, 常方高, 等. 硅纳米线阵列的制备及光伏性能 [J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(1): 29–33.
JIANG Yurong, QIN Ruiping, CHANG Fanggao, et al. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(1): 29–33.

[5] ŠÁLY V, PERN M, JANÍ E K F, et al. Impedance spectroscopy of heterojunction solar cell a-SiC/c-Si with ITO antireflection film investigated at different temperatures [J]. J Phys, 2017, 829(1): 012019.

[6] TAN X Y, YAN W S, TU Y T, et al. Small pyramidal textured ultrathin crystalline silicon solar cells with double-layer passivation [J]. Opt Express, 2017, 25(13): 14725–14731.

[7] UZUM A, ITO S, DHAMRIN M, et al. Non-vacuum process for production of crystalline silicon solar cells [M]. New Res Silicon-Struct Prop, Technol, 2017: 83–123.

[8] 王强. 低缺陷密度大单晶比例太阳能级类单晶硅锭制备及其表面制绒研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2016.
WANG Qiang. Low defect density quasi-crystal silicon ingots with large percentage of single crystal fabrication and its surface nano-texture method study (in Chinese, dissertation). Suzhou: Suzhou University, 2016.

[9] YOSHINAGA S, ISHIKAWA Y, ARAKI S, et al. Numerical analysis of monocrystalline silicon solar cells with fine nanoimprinted textured surface [J]. Jpn J Appl Phys, 2017, 56(2): 022301.

[10] KUNG C Y, YANG C H, HUANG C W, et al. Performance improvement of high efficiency mono-crystalline silicon solar cells by modifying rear-side morphology [J]. Appl Sci, 2017, 7(4): 410.

[11] 殷志刚. 太阳能光伏发电材料的发展现状 [J]. 可再生能源, 2008, 26(5): 17–20.
YIN Zhigang. Renew Energy Res (in Chinese), 2008, 26(5): 17–20.

[12] YANG Xinbo, WEBER K, HAMEIRI Z, et al. Industrially feasible, dopant-free, carrier-selective contacts for high-efficiency silicon solar cells [J]. Prog Photovolt Res Appl, 2017, 25(11): 896–904.

[13] JIANG Y, SHEN H, PU T, et al. High efficiency multi-crystalline silicon solar cell with inverted pyramid nanostructure [J]. Sol Energy, 2017, 142: 91–96.

[14] 李峰. 德研发出转换率逾 20%的多晶硅太阳能电池 [J]. 功能材料信息, 2004(3): 63–63.
LI Feng. Funct Mater Inf (in Chinese), 2004(3): 63–63.

[15] 窦海林, 王波, 张靖宇, 等. 太阳能光伏发电材料研究进展 [J]. 现代制造技术与装备, 2016, 241(12): 46–48.
DOU Hailin, WANG Bo, ZHANG Jingyu, et al. Mod Manuf Technol Equip (in Chinese), 2016, 241(12): 46–48.

[16] BELLANGER P, TRAORÉ M, SUNIL B S, et al. Polycrystalline silicon films obtained by crystallization of amorphous silicon on aluminium based substrates for photovoltaic applications [J]. Thin Solid Films, 2017, 636(8): 150–157.

[17] KRAJANGSANG T, INTHISANG S, SRITHARATHIKHUN J, et al. An intrinsic amorphous silicon oxide and amorphous silicon stack passivation layer for crystalline silicon heterojunction solar cells [J]. Thin Solid Films, 2017, 628(8): 150–157.

[18] FERHATI H, DIEFFAL F, SRAIRI F. Enhancement of the absorbance figure of merit in amorphous-silicon p-i-n solar cell by using optimized intermediate metallic layers [J]. Opt Int J Light Electron Opt, 2017, 130: 473–480.

[19] CHOWDHURY A, MUKHOPADHYAY S, RAY S. Fabrication of thin film nanocrystalline silicon solar cell with low light-induced degradation [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2009, 93(5): 597–603.

[20] HONG A J, HOPSTAKEN M J, KIM J, et al. Buffer layer for high performing and low light degraded solar cells [P]. US Patent, 9306107. 2016–4–5.

[21] HAMAKAWA Y. Thin-film solar cells: next generation photovoltaics and its applications [M]. Phys Status Solidi, 2004, 194(1): 55–67.

[22] LIN J C, HO W J, LIU J J, et al. High-efficiency single-junction GaAs solar cell using ITO-film as an antireflection and passivation layer deposited on AlInP layer by thermally RF sputtering [C]. CLEO: QELS_Fundam Sci Opt Soc Am, 2017, 5: 121.

[23] ZHENG Y, YI T C, WANG J L, et al. Radiation damage analysis of individual subcells for GaInP/GaAs/Ge solar cells using photoluminescence measurements [J]. Chin Phys Lett, 2017(2): 63–66.

[24] GREEN M A, EMERY K. HISHIKAWA Y, et al. Solar cell efficiency tables (version 45) [J]. Prog Photovoltaics, 2015, 23(1): 1–9.

[25] SULTANA R S, BAHAR A N, ASADUZZAMAN M, et al. Numerical

dataset for analyzing the performance of a highly efficient ultrathin film CdTe solar cell [J]. Data in Brief, 2017, 12: 336–340.

[26] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《能源技术革命创新行动计划(2016-2030 年)》的通知[EB/OL]. [2016-06-01]. http://www.nea.gov.cn/2016-06/01/c_135404377.html.

[27] JACKSON P, HARISKOS D, LOTTER E, et al. New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se_2 thin-film solar cells beyond 20% [J]. Prog Photovolt, 2011, 19(7): 894–897.

[28] MORADI M, TEIMOURI R, SAADAT M, et al. Buffer layer replacement: A method for increasing the conversion efficiency of CIGS thin film solar cells [J]. Opt Int J Light Electron Opt, 2017, 136: 222–227.

[29] ASADUZZAMAN M, HASAN M, BAHAR A N. An investigation into the effects of band gap and doping concentration on Cu (In,Ga) Se_2 solar cell efficiency [J]. Springer plus, 2016, 5(1): 1–8.

[30] 马光耀, 康志君, 谢元锋. 铜铟镓硒薄膜太阳电池的研究进展及发展前景 [J]. 金属功能材料, 2009, 16(5): 46–49.
MA Guangyao, KANG Zhijun, XIE Yuanfeng. Metall Funct Mater (in Chinese), 2009, 16(5): 46–49.

[31] 陈秀娟. CIGS 薄膜太阳电池的 γ 射线辐照特性测试与分析 [D]. 天津: 南开大学, 2012.
CHEN Xiujuan. Test and analysis of gamma ray irradiation characteristics of CIGS thin-film solar cells (in Chinese, dissertation). Tianjin: Nankai University, 2012.

[32] 季鑫. 全溅射法$CuInSe_2$太阳能电池的制备、硒化机制和光电机理研究 [D]. 上海: 上海大学, 2016.
JI Xin. The research of the preparation, selenized and photoelectrical mechanism of $CuInSe_2$ thin film solar cell prepared by whole magnetron sputtering (in Chinese, dissertation). Shanghai: Shanghai University, 2016.

[33] 王兴孔. $CuInSe_2$ 薄膜太阳电池 [J]. 青岛大学学报: 自然科学版, 2000(3): 85–88.
WANG Xingkong. $CuInSe_2$ thin film solar cell [J]. J Qingdao Univ(in Chinese), 2000(3): 85–88.

[34] KATAGIRI H, SASAGUCHI N, HOSHINO S, et al. Preparation and evaluation of Cu_2ZnSnS_4 thin films by sulfurization of E-B evaporated precursors [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 1997, 49(1/4): 407–414.

[35] WOO K, KIM Y, MOON J. A non-toxic, solution-processed, earth abundant absorbing layer for thin-film solar cells [J]. Energ Environ Sci, 2012, 5(1): 5340–5345.

[36] EBERSPACHER C, PAULS K, SERRA J. Nonvacuum techniques for fabricating thin-film CIGS [C] Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE. IEEE, 2000: 517–520.

[37] KAPUR V K, FISHER M, ROE R. Fabrication of light weight flexible CIGS solar cells for space power applications [J]. Mrs Online Proceedings Library Archive, 2001, 668: H3.5.1–H3.5.6.

[38] WANG W, WINKLER M T, GUNAWAN O, et al. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency [J]. Adv Energy Mater, 2014, 4(7): 13014651.

[39] OREGAN B, GRATZEL M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films [J]. Nature, 1991, 353(6346): 737–740.

[40] 孟庆波, 孙惠成, 罗艳虹, 等. 染料敏化太阳电池基础研究及产业化新进展 [J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(7): 1045–2011.
MENG Qingbo, SUN Huicheng, LUO Yanhong, et al. J Chin Ceram Soc, 2011, 39(7): 1045–2011.

[41] CHEN X, ZHAO F, LIU W, et al. Facile synthesis of NiS/graphene composite with high catalytic activity for high-efficiency dye-sensitized solar cells [J]. J Solid State Electrochem, 2017, 21(10): 2799–2805.

[42] FAN K, YU J, HO W K. Improving photoanodes to obtain highly efficient dye-sensitized solar cells: a brief review [J]. Mater Horizons, 2017, 4(3): 319–344.

[43] MATHEW S, YELLA A, GAO P, et al. Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers [J]. Nat Chem, 2014, 6(3): 242–247.

[44] 刘志洋, 彭瑞祥, 艾玲, 等. 高效率有机太阳电池的界面工程研究 [J]. 高分子通报, 2017(2): 1–8.
LIU Zhiyang, PENG Ruixiang, AI Ling, et al. Chin Polym Bull (in Chinese), 2017(2): 1–8.

[45] ZHENG Z, AWARTANI O M, GAUTAM B, et al. Efficient charge transfer and fine-tuned energy level alignment in a THF-processed fullerene-free organic solar cell with 11.3% efficiency [J]. Adv Mater, 2016, 29(5): 1604241.

[46] 科苑. 我国可溶性有机小分子太阳电池研究获进展 [J]. 军民两用技术与产品, 2017(3): 35–35.
KE Wan. Dual Use Technol Prod, 2017(3): 35–35.

[47] GUO Y, LEI H, XIONG L, et al. Single phase, high hole mobility Cu_2O film as efficient and robust hole transporting layer for organic solar cells [J]. J Mater Chem A, 2017, 5(22): 11055–11062.

[48] 张昱. 基于氟取代BT和BTA有机光伏材料合成与表征 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
ZHANG Yu. Synthesis and characterizations of organic photovoltaic materials based on fluoro-substituted BT and BTA(in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

[49] KROTO H W, HEATH J R, BRIEN S C O, et al. C60: Buckminster fullerene [J]. Nature, 1985, 318 (6042): 162–163.

[50] KALLMANN H, POPE M. Photovoltaic effect in organic crystals [J]. J Chem Phys, 1959, 30(2): 585–586.

[51] YOU J, DOU L, YOSHIMURA K, et al. A polymer tandem solar cell with 10.6% power conversion efficiency [J]. Nat Commun, 2013, 4: 1446.

[52] LUO P, XIA W, ZHOU S, et al. Solvent engineering for ambient-air-processed, phase-stable $CsPbI_3$ in perovskite solar cells [J]. J Phys Chem Lett, 2016, 7(18): 3603–3610.

[53] ZHAO Y, LIU B, YU Z L, et al. Strong ferroelectric polarization of $CH_3NH_3GeI_3$ with high-absorption and mobility transport anisotropy: Theoretical study [J]. J Mater Chem C, 2017(5): 5356–5364.

[54] National Renewable Energy Laboratory(NREL). Research cell efficiency records [DB/OL]. [2017-03-02]. http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiencychart.jpg.

[55] LUO L, MEN L, LIU Z, et al. Ultrafast terahertz snapshots of excitonic Rydberg states and electronic coherence in an organometal halide perovskite [J]. Nat Commun, 2017, 8: 15565.

[56] MIYASAKA T, KOJIMA A, TESHIMA K. Lead halide perovskites as quantum dot sensitizers for mesoscopic TiO_2 photovoltaic cells [C]. Electrochem Soc, 2009(9): 742–742.

[57] MING W, SHI H, DU M H. Large dielectric constant, high acceptor density, and deep electron traps in perovskite solar cell material $CsGeI_3$ [J]. J Mater Chem A, 2016, 4(36): 13852–13858.

[58] National Renewable Energy Laboratory(NREL). Perovskite solar cells [EB/OL]. [2017-6-12]. https://www.nrel.gov/pv/perovskite-solar-cells.html.

[59] 郭立雪, 田建军, 曹国忠, 等. Ag@TiO_2 纳米颗粒等离激元效应增强钙钛矿太阳能薄膜电池性能 [J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(10): 1393–1400.
GUO Lixue, TIAN Jianjun, CAO Guozhong, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(10): 1393–1400.

[60] XIAO Z G, BI C, SHAO Y C, et al. Efficient, high yield perovskite photovoltaic devices grown by interdiffusion of solution-processed precursor stacking layers [J]. Energy Environ Sci, 2014, 7: 2619–2623.

[61] LIU M, JOHNSTON M B, SNAITH H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition [J]. Nature, 2015, 501: 395.

[62] BURSCHKA J, PELLET N, MOON S J, et al. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells [J]. Nature, 2013, 499(7458): 316–320.

[63] BI D, GAO P, SCOPELLITI R, et al. High-performance perovskite solar cells with enhanced environmental stability based on amphiphile-modified $CH_3NH_3PbI_3$ [J]. Adv Mater, 2016, 28(15): 2910–2915.

[64] CHEN Y, SUN Y, PENG J, et al. Tailoring organic cation of 2D air-stable organometal halide perovskites for highly efficient planar solar cells [J]. Adv Energy Mater, 2017, 7(18): 1700162.

[65] ZIMMERMANN I, MOSCONI E, LEE X, et al. One-Year stable perovskite solar cells by 2D/3D interface engineering [J]. Nat Commun, 2017, 8: 15684.

[66] SONG Z, ABATE A, WATTHAGE S C, et al. Perovskite solar cell stability in humid air: partially reversible phase transitions in the PbI_2-CH_3NH_3I-H_2O system [J]. Adv Energy Mater, 2016, 6(19): 1600846.

[67] NAM J K, CHAI S U, CHA W, et al. Potassium incorporation for enhanced performance and stability of fully inorganic cesium lead halide perovskite solar cells [J]. Nano Lett, 2017, 17(3): 2028–2033.

[68] 李荣荣, 边志坚, 丁占来, 等. 柔性薄膜太阳电池的研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(7): 878–885.
LI Rongrong, BIAN Zhijian, DING Zhanlai, et al. J Chin Ceram Soc, 2014, 42(7): 878–885.

[69] CHANDRASEKHAR P S, VAMSI K K. Graphene/ZnO nanocomposite as an electron transport layer for perovskite solar cells; the effect of graphene concentration on photovoltaic performance [J]. R Soc Chem, 2017, 7(46): 28610–28615.

[70] FENG L. Quantum dot-sensitized solar cells [J]. Prog Chem, 2013, 25(2–3): 409–418.

[71] DU J, DU Z, HU J S, et al. Zn-Cu-In-Se quantum dot solar cells with a certified power conversion efficiency of 11.6% [J]. J Am Chem Soc, 2016, 138(12): 4201–4209.

[72] SWARNKAR A, MARSHALL A R, CHAKRABARTI T. Quantum dot–induced phase stabilization of α-$CsPbI_3$ perovskite for high-efficiency photovoltaics [J]. Science, 2016, 354(6308): 92–95.

[73] KWAK G Y, LEE S H, JANG J S, et al. Band engineering of a Si quantum dot solar cell by modification of B-doping profile [J].Sol Energy Mater Sol Cells, 2017, 159: 80–85.

[74] 张敏, 王宏伟, 齐庆杰, 等. Cu2ZnSnS4 纳米片阵列在量子点敏化太阳电池对电极中的应用 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(4): 478–482.
ZHANG Min, WANG Hongwei, QI Qingjie, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(4): 478–482.

[75] TABOR H. Selective radiation. I. wavelength discrimination. II. wavefront discrimination [J]. Bull Res Counc Isr Sect C, 1956, 5a(2): 119–134.

[76] ZHANG Q C, ZHAO K, ZHANG B C, et al. New cermet solar coatings for solar thermal electricity applications [J]. Sol Energy, 1998, 64(1–3): 109–114.

[77] 史月艳, 那鸿悦. 太阳光谱选择性吸收膜系设计、制备及测评 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

[78] SELVAKUMAR N, BARSHILIA H C. Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2012, 98(5): 1–23.

[79] ZHANG Q C, MILLS D R. Very low-emittance solar selective surfaces using new film structures [J]. J Appl Phys, 1992, 72(7): 3013–3021.

[80] ANDERSSON A, HUNDERI O, GRANQVIST C G. Nickel pigmented anodic aluminum oxide for selective absorption of solar energy [J]. J Appl Phys, 1980, 51(1): 754–764.

[81] BORN M, WOLF E. Principles of Optics [M]. Pergamon, 1959.

[82] ZHANG K, HAO L, DU M, et al. A review on thermal stability and high temperature induced ageing mechanisms of solar absorber coatings [J]. Renew Sust Energy Rev, 2017, 67: 1282–1299.

[83] GAOUYAT L, MIRABELLA F, DEPARIS O. Critical tuning of magnetron sputtering process parameters for optimized solar selective absorption of $NiCrO_x$, cermet coatings on aluminium substrate [J]. Appl Surf Sci, 2013, 271(8): 113–117.

[84] SIBIN K P, JOHN S, BARSHILIA H C. Control of thermal emittance of stainless steel using sputtered tungsten thin films for solar thermal power applications [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2015, 133: 1–7.

[85] REBOUTA L, SOUSA A, CAPELA P, et al. Solar selective absorbers based on Al_2O_3 : W cermets and AlSiN/AlSiON layers [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2015, 137: 93–100.

[86] XU X H, RAO Z G, WU J F, et al. In-situ synthesis and thermal shock resistance of cordierite/silicon carbide composites used for solar absorber coating [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2014, 130: 257–263.

[87] NURU Z Y, ARENDSE C J, MULLER T F, et al. Thermal stability of electron beam evaporated Al_xO_y/Pt/Al_xO_y, multilayer solar absorber coatings [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2014, 120(1): 473–480.

[88] GONG D, LIU H, LUO G, et al. Thermal aging test of AlCrNO-based solar selective absorbing coatings prepared by cathodic arc plating [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2015, 136: 167–171.

[89] SÁNCHEZ-CRUCES E, BARRERA-CALVA E, LAVANDEROS K, et al. Life cycle analysis (lca) of solar selective thin films by electrodeposition and by sol-gel techniques [J]. Energy Procedia, 2014, 57: 2812–2818.

[90] TULCHINSKY D, UVAROV V, POPOV I, et al. A novel non-selective coating material for solar thermal potential application

formed by reaction between sol–gel titania and copper manganese spinel [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2014, 120(1): 23–29.

[91] AMRI A, JIANG Z T, PRYOR T, et al. Developments in the synthesis of flat plate solar selective absorber materials via sol–gel methods: A review [J]. Renew Sust Energ Rev, 2014, 36: 316–328.

[92] LANXNER M, ELGAT Z. Solar selective absorber coating for high service temperatures, produced by plasma sputtering[A]// Proceedings of SPIE [C]. The Hague: The International Society for Optical Engineering, 1990: 240–249.

[93] FAROOQ M, GREEN A A, HUTCHINS M G. High performance sputtered Ni: SiO_2, composite solar absorber surfaces [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 1998, 54(1–4): 67–73.

[94] FAROOQ M, HUTCHINS M G. Optical properties of higher and lower refractive index composites in solar selective coatings [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2002, 71(1): 73–83.

[95] TEIXEIRA V, SOUSA E, COSTA M F, et al. Chromium-based thin sputtered composite coatings for solar thermal collectors [J]. Vacuum, 2002, 64(3/4): 299–305.

[96] TEIXEIRA V, SOUSA E, COSTA M F, et al. Spectrally selective composite coatings of Cr–Cr_2O_3, and Mo–Al_2O_3, for solar energy applications [J]. Thin Solid Films, 2001, 392(2): 320–326.

[97] NUNES C, TEIXEIRA V, COLLARES-PEREIRA M, et al. Deposition of PVD solar absorber coatings for high-efficiency thermal collectors [J]. Vacuum, 2002, 67(3/4): 623–627.

[98] NUNES C, TEIXEIRA V, PRATES M L, et al. Graded selective coatings based on chromium and titanium oxynitride [J]. Thin Solid Films, 2003, 442(1/2): 173–178.

[99] KADIRGAN F, SÖHMEN M, İ.E. TÜRE, et al. An investigation on the optimisation of electrochemically pigmented aluminium oxide selective collector coatings [J]. Renew Energ, 1997, 10(2–3): 203–206.

[100] SCHÜLER A, DUTTA D, CHAMBRIER E D, et al. Sol–gel deposition and optical characterization of multilayered $SiO_2/Ti_{1-x}Si_xO_2$, coatings on solar collector glasses [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2006, 90(17): 2894–2907.

[101] SCHÜLER A, VIDENOVIC I R. Titanium containing amorphous hydrogenated silicon carbon films (a-Si:C:H/Ti) for durable solar absorber coatings [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2001, 69(3): 271–284.

[102] YIN Z, XUE Z, ZHANG J, et al. Graded Al-N/Al absorbing surfaces for all-glass evacuated tubular collectors—R, D and production: bridging the gap [J]. Renew Energ, 1999, 16(1–4): 624–627.

[103] SHEN Y, SHI Y, WANG F. High-temperature optical properties and stability of Al_xO_y–AlN_x –Al solar selective absorbing surface prepared by DC magnetron reactive sputtering [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2003, 77(4): 393–403.

[104] 谢光明. 光谱选择性吸收涂层 [J]. 太阳能, 1998(3): 14–15.
XIE Guangming. Sol Energy (in Chinese), 1998(3): 14–15.

[15] 陈德明, 徐刚. 太阳能热利用技术概况 [J]. 物理, 2007, 36(11): 840–847.
CHEN Deming, XU Gang. Physics (in Chinese), 2007, 36(11): 840–847.

[106] BARSHILIA H C, SELVAKUMAR N, RAJAM K S, et al. TiAlN/TiAlON/Si_3N_4 tandem absorber for high temperature solar selective applications [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(19): p29.

[107] BARSHILIA H C, SELVAKUMAR N, RAJAM K S, et al. Spectrally selective NbAlN/NbAlON/Si_3N_4 tandem absorber for high-temperature solar applications [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2008, 92(4): 495–504.

[108] CAO F, KRAEMER D, SUN T, et al. Enhanced thermal stability of W-Ni-Al_2O_3 cermet-based spectrally selective solar absorbers with tungsten infrared reflectors [J]. Adv Energy Mater, 2014, 5(2): 1401042.

[109] CAO F, KRAEMER D, TANG L, et al. A high-performance spectrally-selective solar absorber based on a yttria-stabilized zirconia cermet with high-temperature stability [J]. Energ Environ Sci, 2015, 8(10): 3040–3048.

[110] CAO F, TANG L, LI Y, et al. A high-temperature stable spectrally-selective solar absorber based on cermet of titanium nitride in SiO_2, deposited on lanthanum aluminate [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2017, 160(1): 12–17.

[111] MOON J, LU D, VANSADERS B, et al. High performance multi-scaled nanostructured spectrally selective coating for concentrating solar power [J]. Nano Energy, 2014, 8(9): 238–246.

[112] REBOUTA L, SOUSA A, CAPELA P, et al. Solar selective absorbers based on Al_2O_3:Wcermets and AlSiN/AlSiON layers [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2015, 137: 93–100.

[113] KENNEDY C E. Review of mid-to high-temperature solar selective absorber materials[R]. National Renewable Energy Lab, NREL/TP-520-31267, Golden: National Renewable Energy Lab, 2002: 1–58.

[114] ANTONAIA A, CASTALDO A, ADDONIZIO M L, et al. Stability of W-Al_2O_3 cermet based solar coating for receiver tube operating at high temperature [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2010, 94(10): 1604–1611.

[115] PINCH H L, ABELES B, GITTLEMAN J I. Method of making high resistance cermet film[P]. US Patent, 4071426. 1978–1–31.

[116] ZOU C, XIE W, SHAO L. Functional multi-layer solar spectral selective absorbing coatings of AlCrSiN/AlCrSiON/AlCrO for high temperature applications [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2016, 153: 9–17

[117] LIU Y, WANG C, SUN Y, et al. Optical design and preparation of high performance Mo/NiAlN/NiAlON/SiO_2 solar selective absorbing coating [J]. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(2): 171–178.

[118] LIU Y, WANG Z, LEI D, et al. A new solar spectral selective absorbing coating of SS–(Fe_3O_4)/Mo/TiZrN/TiZrON/SiON for high temperature application [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2014, 127(4): 143–146.

[119] WU Y, WANG C, SUN Y, et al. Optical simulation and experimental optimization of Al/NbMoN/NbMoON/SiO_2, solar selective absorbing coatings [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2015, 134: 373–380.

[120] WU Y, WANG C, SUN Y, et al. Study on the thermal stability of Al/NbTiSiN/NbTiSiON/SiO_2, solar selective absorbing coating [J]. Sol Energy, 2015, 119: 18–28.

[121] NING Y, WANG W, WANG L, et al. Optical simulation and preparation of novel Mo/ZrSiN/ZrSiON/SiO_2 solar selective absorbing coating [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2017, 167: 178–183.

[122] WU S, CHENG C H, HSIAO Y J, et al. Fe_2O_3 films on stainless steel for solar absorbers [J]. Renew Sust Energ Rev, 2016, 58: 574–580.

[123] GAO X H, WANG C B, GUO Z M, et al. Structure, optical properties

and thermal stability of Al_2O_3-WC nanocomposite ceramic spectrally selective solar absorbers [J]. Opt Mater, 2016, 58: 219–225.

[124] GAO X H, GUO Z M, GENG Q F, et al. Structure, optical properties and thermal stability of TiC-based tandem spectrally selective solar absorber coating [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2016, 157: 543–549.

[125] GAO X H, GUO Z M, GENG Q F, et al. Microstructure, chromaticity and thermal stability of SS/TiC-WC/Al_2O_3, spectrally selective solar absorbers [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2017, 164: 63–69.

[126] 郝雷, 王树茂, 蒋利军, 等. 非真空高温太阳光谱选择性吸收涂层的研制 [J]. 科学通报, 2009, 54(2): 251–254.
HAO Lei, WANG Shumao, JIANG Lijun, et al. Chin Sci Bull (in Chinese), 2009, 54(2): 251–254.

[127] DU M, LIU X, HAO L, et al. Microstructure and thermal stability of Al/$Ti_{0.5}Al_{0.5}N$/$Ti_{0.25}Al_{0.75}N$/AlN solar selective coating [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2013, 111(4): 49–56.

[128] ZHANG K, DU M, HAOA L, et al. Highly corrosion resistant and sandwich-like Si_3N_4/Cr-CrN_x/Si_3N_4 coatings used for solar selective absorbing applications [J]. Acs Appl Mater Inter, 2016, 8(49): 34008.

[129] ZHANG K, HAO L, DU M, et al. A review on thermal stability and high temperature induced ageing mechanisms of solar absorber coatings [J]. Renew Sust Energ Rev, 2017, 67: 1282–1299.

[130] FENG J, ZHANG S, LIU X, et al. Solar selective absorbing coatings TiN/TiSiN/SiN prepared on stainless steel substrates [J]. Vacuum, 2015, 121: 135–141.

[131] FENG J, ZHANG S, LU Y, et al. The spectral selective absorbing characteristics and thermal stability of SS/TiAlN/TiAlSiN/Si_3N_4, tandem absorber prepared by magnetron sputtering [J]. Sol Energy, 2015, 111: 350–356.

[132] WU L, GAO J, LIU Z, et al. Thermal aging characteristics of CrN_xO_y, solar selective absorber coating for flat plate solar thermal collector applications [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2013, 114(114): 186–191.

[133] WANG X, GAO J, HU H, et al. High-temperature tolerance in WTi-Al_2O_3, cermet-based solar selective absorbing coatings with low thermal emissivity [J]. Nano Energy, 2017, 37: 232–241.

[134] WANG J, WEI B, WEI Q, et al. Optical property and thermal stability of Mo/Mo–SiO_2/SiO_2 solar−selective coating prepared by magnetron sputtering [J]. Phys Status Solidi, 2011, 208(3): 664–667.

[135] 王健, 陈子君, 李德杰, 等. 基于钼二维表面光栅的高温太阳能选择性吸收表面设计 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(7): 1087–1090.
WANG Jian, CHEN Zijun, LI Dejie, et al. Acta Energy Sin (in Chinese), 2011, 32(7): 1087–1090.

[136] YANG R, LIU J, LIN L, et al. Optical properties and thermal stability of colored solar selective absorbing coatings with double-layer antireflection coatings [J]. Sol Energy, 2016, 125: 453–459.

[137] 国家能源局. 太阳能发展“十三五”规划 [J]. 太阳能, 2016, 12: 5–14.
National Energy Administration. Sol Energy (in Chinese), 2016, 12: 5–14.

[138] 王传东. 热电池发展综述 [J]. 电源技术, 2013, 37(11): 2077–2079.
WANG Chuandong. Chin J Power Sources (in Chinese), 2013, 37(11): 2077–2079.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※

王聪，北京航空航天大学物理科学与核能工程学院，教授，博士生导师。科研方向包括：太阳能聚焦热发电高温太阳光谱选择性吸收涂层(光-热转换多层膜)；热控薄膜；空间太阳能热利用、固体导热与相变储热技术；半导体光催化纳米材料的研究；反钙钛矿化合物的反常(负、低、零膨胀)热膨胀性质、及其关联的磁、电、热输运性质；磁致伸缩，磁卡效应等。