

文章编号: 0254-0096(2020)02-05-06

编者按: 本栏目对《2019年光伏技术发展报告》中的部分章节进行节选刊登。

2019年中国光伏技术发展报告(2)

中国可再生能源学会光伏专业委员会

(中国可再生能源学会, 北京 100190)

1.3 铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池的研究进展

1.3.1 CIGS 薄膜太阳能电池的研究概况

2018年, 四方创能光电技术有限公司与清华大学的庄大明教授合作研发的小面积电池效率达到21.49%(有效面积为 0.46 cm^2)。在CIGS叠层电池方面, 比利时欧洲跨校际微电子研究中心(IMEC)与德国巴登符腾堡太阳能和氢能源研究中心(ZSW)制备的串联钙钛矿与CIGS的新型薄膜太阳能电池的转换效率达24.6%, 为钙钛矿-CIGS双结叠层太阳能电池创下新的纪录^[31]。Solibro公司发布最新量产大尺寸的世界冠军组件效率值, 经TÜV Rheinland认证中心认证, 其开发的 $1190\text{ mm}\times 789.5\text{ mm}$ 大面积玻璃基CIGS薄膜太阳能电池全面积效率达到17.52%(开孔面积效率为18.7%), 组件输出功率为 164.7 W ^[32]。

1.3.2 CIGS 薄膜太阳能电池研究的国际进展

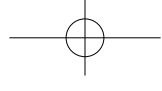
与转换效率不断提高相匹配的是在技术创新方面取得良好的进展。

1) 在CIGS发展史上, Na元素对CIGS性能的有利影响和作用机理被认为是具有里程碑意义的发现。虽然适量Na元素掺杂有利于提高CIGS多晶硅太阳能电池效率已被广泛认可, 但Na元素掺杂对CIGS单晶硅太阳能电池的作用还不明确。卢森堡大学的COLOMBARA等^[33]发现Na元素可以促进GaAs单晶硅衬底上生长的CIGS中In和Ga的相互扩散, 这一现象与Na元素阻碍CIGS多晶硅中In和Ga的相互扩散这一结论完全相反,

该成果发表在Nature Communications上。KF后处理被认为具有减薄缓冲层同时维持较高填充因子的作用, 从而可提高电池效率。Solar Frontier利用CsF后处理提高吸收层表面禁带宽度和晶体质量, 将CIGS电池的开路电压损失降低到384 mV, 从而显著提高了电池的开路电压和填充因子, 获得效率22.9%的世界纪录。2018年, 本领域的研究主要集中在利用原子探针层析(APT)、三维飞行时间二次离子质谱分析(3D-TOF-SIMS)、扫描透射电镜(STEM)及纳米X射线荧光(nanoXRF)等表征手段在纳米尺度分析重碱金属掺杂对CIGS太阳能电池的微观结构及性能的影响方面^[34-37]。

2) 无镉环保缓冲层研究及电池制备。为获得高效率电池, 在CIGS太阳能电池制备中通常采用CdS作为缓冲层。虽然Cd以化合物形式存在, 对环境的污染风险较小, 但是对环境的潜在破坏仍然促使人们不断对无Cd缓冲层进行研发。目前的无Cd缓冲层主要有干法磁控溅射和湿法化学水浴制备的 Zn(O,S) 、 In_2S_3 、 $(\text{Zn,Mg})\text{O}$ 等。2018年Solar Frontier利用 $\text{Cd}_{0.75}\text{Zn}_{0.25}\text{S}/\text{Zn}_{0.79}\text{Mg}_{0.21}\text{O}$ 取代CdS/i-ZnO缓冲层, 同时利用加热光浴-光浴后处理获得21.2%的电池效率^[38]。

3) 基于窄禁带CIGS背电池的叠层电池。CIGS的带隙在 $1.0\sim 1.7\text{ eV}$ 可调且具有较高的吸光系数, 被认为是最理想的叠层电池材料。2018年, 利用宽禁带钙钛矿作为前电池与窄禁带CIGS作为背电池制备双节叠层电池获得巨大突



破。8 月末,加州大学洛杉矶分校与 Solar Frontier 在 Science 发表双端子型串联钙钛矿—CIGS 叠层电池世界效率 22.4% 的文章^[39]。1 个月后,IMEC 与 ZSW 将钙钛矿—CIGS 叠层电池的转换效率突破至 24.6%,此电池结构为四端子型串联钙钛矿—CIGS 双结叠层电池^[31]。

1.3.3 CIGS 薄膜太阳电池研究的国内进展

2018 年国内多个研究单位在 CIGS 薄膜太阳电池研究中取得进展。

1) 中国科学院深圳先进技术研究院 CIGS 太阳电池研发进展。该院光子信息与能源材料研究中心利用三步共蒸发在钠钙玻璃基底上制备的面积为 0.5 cm^2 的 CIGS 电池效率为 21.3%,是目前共蒸发制备 CIGS 太阳电池效率的国内纪录,由北京鉴衡认证中心有限公司认证。该效率的突破主要是在三步共蒸发法中主动调节 Ga 的梯度分布,改善能带梯度,并且利用 KF 后处理工艺,开路电压达到 719 mV,比未经 KF 处理的提高 30~40 mV。

2) 四方创能光电技术有限公司与清华大学合作研究进展。清华大学材料学院庄大明课题组 2018 年在 CIGS 电池方面的研究目标主要是提高电池的开路电压 V_{oc} ,其探索了不同 Ga 含量的 CIGS 电池特性,结果表明,提高 Ga 含量确实可显著提高电池 V_{oc} ^[40-42],但是 Ga/III 百分比超过 33% 后,电池的短路电流 I_{sc} 急剧劣化,导致电池效率随之下降^[40-41]。为延迟高 Ga 含量对电池 I_{sc} 的影响比例,采用碱金属后处理,不仅可显著提高禁带宽度,还可钝化缺陷,略微提高 I_{sc} ^[43]。

① 小面积 CIGS 电池的研制。采用钠钙玻璃基底的 CIGS 电池的效率为 21.49%,有效面积为 0.46 cm^2 ,创造国内溅射硒化法制备的 CIGS 电池的效率新纪录,由中国科学院太阳能光伏发电系统和风力发电系统质量检测中心于 2018 年 4 月 11 日认证。

电池制备工艺为: CIGS 四元靶材溅射加热处理,利用不同 Ga 含量的四元靶材进行依次溅射,在预制膜中形成 Ga 含量的梯度,在含

H_2Se 气体的气氛下进行高温退火处理,使吸收层最终形成 U 型带隙分布。

② CIGS 组件的产业化开发。尺寸为 $1245\text{ mm}\times 635\text{ mm}$ 的 CIGS 组件的效率最高达 13.0%。

电池制备工艺为: 在 $1245\text{ mm}\times 635\text{ mm}$ 的玻璃基板上沉积 CIGS,同样利用吸收层梯度带隙方式制备预制膜,退火后形成 Ga 含量的 U 型分布来制备电池。组件采用全激光刻划技术进行内联,可将死区宽度控制在 $200\text{ }\mu\text{m}$ 以内。

主要的技术路径为: 采用不同 Ga 含量的四元靶材,通过磁控溅射工艺在预制膜中构建 Ga 含量的梯度分布,在含硒气氛下对预制膜进行退火,从而在 CIGS 吸收层中形成 U 型分布的带隙梯度。

3) 国家能源投资集团(原神华集团)CIGS 光伏组件开发和量产进展。2017 年原神华集团、上海电气和德国曼兹公司(Manz)三方合作,组建集研发、装备制造和组件生产于一体的 CIGS 光伏合资公司: 神华(北京)光伏科技发展有限公司、重庆神华薄膜太阳能科技有限公司、苏州曼兹新能源装备有限公司。

小面积 CIGS 薄膜太阳电池的效率提升: 神华(北京)光伏科技的合作方 ZSW 是提升小面积 CIGS 薄膜电池效率的主力军,其标杆项目为 Sharc25。

大面积 CIGS 薄膜光伏组件产业化方面: ① 北京 44 MW 实验线建造: 神华(北京)光伏科技有限公司将在北京低碳清洁能源研究所园区内建造 44 MW 的 CIGS 实验线,设备由苏州曼兹新能源装备有限公司提供,技术与 NICE Solar Energy GmbH 已有的和正在开发的技术一致。② 重庆 306 MW 生产线建造: 2017 年底,重庆神华 CIGS 薄膜光伏组件项目在当地开工。首期产线为 306 MW,技术来自神华(北京)光伏科技有限公司,设备同样由苏州曼兹新能源装备有限公司提供。

4) 中国建材集团 CIGS 太阳电池研发与产业化进展。中国建材集团所属凯盛集团收购德国



Avancis 公司, 并成立凯盛光伏材料有限公司, 利用 Avancis 的溅射硒化技术制备 CIGS 太阳能电池。制备的尺寸为 30 cm×30 cm、孔径面积为 622 cm² 的无镉 CIGS 组件效率为 17.9%, 得到弗劳恩霍夫太阳能系统研究所的权威认证。

5) 汉能各下属全资子公司 CIGS 太阳能电池研发与产业化进展。汉能旗下共有德国 Solibro、美国 MiaSolé、美国 Global Solar Energy 3 家全资海外子公司, 其 2018 年的效率进展情况如表 1 所示。

表 1 截至 2018 年汉能各下属公司在 CIGS 太阳能电池方面取得的效率进展

Table 1 Efficiency progress made by Hanergy's subsidiaries in CIGS cells by 2018

公司名称	Solibro	MiaSolé	Global Solar Energy
小电池效率	21.2%, 1.0 cm ²	19.4%, 1.0 cm ²	19.3%, 1.0 cm ²
sub-module	18.8%(AA), 900 cm ²	—	16.7%(AA), 970 cm ²
冠军组件	17.52%, 0.94 m ²	17.4%, 3001 cm ²	16.4%, 8060 cm ²

① 汉能 Solibro。汉能 Solibro CIGS 薄膜太阳能电池生产技术采用共蒸法, 其多点源共蒸技术可灵活改变工艺流程来控制成膜组分及禁带宽度。

2018 年 1 月, Solibro 公司发布最新量产大尺寸的世界冠军组件效率值, 经 TÜV Rheinland 认证中心认证, 其开发的 1190 mm×789.5 mm 大面积玻璃基 CIGS 电池全面积效率达到 17.52%(开孔面积效率为 18.7%), 组件输出功率为 164.7 W^[43]。汉能 Solibro 的研发团队还在无镉缓冲层、双面电池、碱金属后处理、Ag 掺杂等方面进行了研究^[37, 44-49]。

② 汉能 MiaSolé。汉能 MiaSolé 采用一站式卷绕镀膜技术, 在溅射设备、“卷对卷”生产工艺、溅射沉积技术、材料、设备表征和可靠性等方面处于世界领先水平。

MiaSolé 研究发现, 在磁控溅射沉积 MoNa 背电极层时, 不同的沉积温度、气氛对 Na 在 CIGS 吸收层中的扩散、吸收层与背电极界面

的影响, 找到了提高电池效率的途径。分析了在磁控溅射沉积 CIGS 过程中, 温度、硒化、Na 组分等生长条件对 Ga/(In+Ga) 的影响; 研究了 Ga/(In+Ga) 梯度分布对太阳能电池性能的影响, 目前溅射沉积法制备的电池效率最高达到了 17.96%(内部测试)。

MiaSolé 公司于 2018 年 9 月在荷兰登博斯市完成欧洲最大的柔性组件工程——在 Maaspoort 体育中心顶部铺设 418 片柔性光伏组件, 年发电量将达 125 MWh^[50]。该公司开发的柔性 CIGS 组件的特点在于背面采用自粘型的胶膜, 能非常方便的直接粘贴到由 Evalon 膜制造的屋顶上, 为组件铺设提供了便利的施工条件。

③ 汉能 Global Solar Energy(GSE)。汉能 GSE 柔性 CIGS 薄膜共蒸技术采用不锈钢衬底“卷对卷”的生产工艺及紧凑、高产的沉积设备, 可实现材料的高效利用。其独特的柔性产品封装技术, 尤其是后续研发成功的 ICI(集成芯片互联)技术, 在全球处于领先地位。该技术首先利用光刻技术制备电极, 再用激光焊接方式将前后电极连接起来, 达到减少串联电阻、提升组件转换效率的目的。封装材料包括前板复合膜、EVA 及背板复合膜, ICI 封装技术不仅可降低成本、提高转换效率, 还可降低工艺复杂度、提高组件可靠性。

汉能 GSE 推出其 PowerFLEX^{®+} 系列产品, 柔性组件效率达到 15%, 在炎热、阴天、低辐照、高纬度等地区的性能表现突出^[51]。该类组件具有较强美学特征和较低廉的成本, 安装较方便, 目前在屋顶、车顶等曲面领域应用广泛。

6) 铜铟镓硒薄膜技术的推广应用。

① 柔性光伏组件在屋顶项目中的应用。2018 年 8 月完工的电科院赵公口 203 kW_p 分布式光伏项目, 位于北京市海淀区赵公口, 屋顶使用面积为 2030 m²。该项目采用汉能 GSE PowerFLEX^{®+} 6 m 柔性薄膜光伏组件, 该组件拥有轻、薄、柔、易、高等产品优势。与其他玻璃基组件相比, 该组件重量优势明显, 不带背胶时每 m² 仅重 2.3

kg(带背胶时为 3 kg),适用于对荷载有严苛要求的屋面,以及建筑立面和移动应用场景;组件厚度仅 3 mm,安装便捷且将其安装于屋顶时无需支架系统,操作简单,适用于 TPO(热塑性聚烯烃)和 EPDM(三元乙丙橡胶)防水膜、镀层钢板(如立接缝金属屋面)、改性沥青等不同屋面材质。这种安装方式具有高抗风性能且不破坏屋顶。此外,相较于传统玻璃基组件,该类组件可节省 30% 的支架系统和安装成本;同时具有柔软可弯曲的特性,可应用于弧形的屋顶、棚顶;由于对阳光入射角要求低,可水平铺装,组件之间无遮挡,无组件间距要求,可实现最大的有效利用面积,提高单位面积装机量。根据北京市的年太阳总辐射量为 1500 kWh/m^2 计算,该项目每年可发电 20.09 万 kWh,每年将减排 CO_2 约 220.3 t。



图 15 汉能 GSE PowerFLEX[®] 组件铺设的赵公口项目
Fig. 15 Zhao Gongkou project of Hanergy GSE PowerFLEX[®] PV modules

② 汉瓦的应用。苏州同里综合能源服务中心屋顶项目采用汉能汉瓦,将柔性 CIGS 薄膜太阳能电池与屋面瓦融为一体,兼具发电和建材产品的功能。工作时,汉瓦背部的空气层因受热膨胀而上升,瓦背气压减小,外部气流从通风口不断涌入,由内而外的气流循环使采用汉瓦的屋顶较普通屋顶更遮阳隔热。该项目的装机量为 20.31 kW,采用 677 片单片功率为 30 W 的标准汉瓦组件,已安装完成。苏州同里湖嘉苑被动式建筑已获得中国住建部科发中心与德国能源署的双重认证,住宅实现建筑自发用电的“零能耗”,还具备被动储能、室温调节与智能语音控制家居等功能。

汉瓦的多样造型可满足不同的建筑风格,其优异的性能适应各种各样的环境,自问世至今已被广泛应用于别墅、民俗村、新农村自建房、政府机关单位、景区游客中心等风格各异建筑上,为生态文明建设赋予新能量。



图 16 苏州同里湖嘉苑汉瓦屋顶项目
Fig. 16 Tongli lake jiayuan hanwa roof project in Suzhou

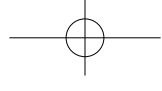
③ 屋顶电站应用——Solibro SlideIn 组件。上海青浦湖畔佳苑一栋高档别墅的屋顶项目总装机量为 25.87 kW,日发电 90 kWh,采用汉能 Solibro SlideIn 组件,不仅安装更便捷、更安全、更省心,还具有卓越的防水、排水性能。该组件为 CIGS 双玻光伏组件,采用滑入式安装,不同于传统的压块固定组件存在施工易碎的缺点,其在安装过程中不易碎且基本无阻力,轻轻一推,即可匀速、精准装卡到位,使 SlideIn 光伏系统可直接节省人力成本近 40%。此外,该光伏系统可解决屋顶光伏安装漏水痛点,具有卓越的防水、排水性能,给屋顶多了一层保护。



图 17 上海青浦湖畔佳苑别墅屋顶光伏项目
Fig. 17 Shanghai qingpu lakeside jiayuan villa roof PV project

1.3.4 CIGS 薄膜太阳能电池的发展趋势展望

近几年 CIGS 小面积太阳能电池的效率稳步提升,产业化方面也获得较大发展,尤其是国内一



些著名企业的大力投入,使全球 CIGS 产业化中心转移到中国。CIGS 太阳电池转换效率得到进一步突破,但其产业化方面仍有一些问题需要解决。未来在 CIGS 研发、技术进步和产业化推进等方面的发展趋势可以概括为:

1) 进一步深入探索 Li、Na、K、Rb、Cs 等碱金属的作用机理。着重研究碱金属元素在吸收层的分布,以及其对 CdS/CIGS 界面态的影响和钝化缺陷的作用等,优化碱金属后处理工艺和区分不同碱金属的作用机理。

2) 近几年内 CIGS 薄膜太阳电池的转换效率有望达到 25%。未来需要突破的方向有高结晶质量的宽禁带 CIGS 吸收层、新的吸收层制备工艺、对碱金属掺杂的深入理解、新型宽禁带缓冲层等。

3) 基于 CIGS 太阳电池的叠层太阳电池效率有望突破 30%。CIGS 太阳电池的禁带宽度在 1.0~1.7 eV 之间可调,可与钙钛矿、晶体硅及 CIGS 本身等多种太阳电池形成叠层电池,双节电池的理论极限高达 45%,具有极大科研价值和应用潜力。目前基于窄禁带 CIGS 与钙钛矿的叠层电池效率已高达 24.7%,基于宽禁带(禁带宽度>1.5 eV)CIGS 与窄禁带(禁带宽度约 1.0 eV)CIGS 的双节叠层太阳电池效率为 22.0%。如何提高宽禁带和窄禁带 CIGS 太阳电池效率及新型透明导电背电极将是未来主要研究方向。

4) 在产业化方面,随着有实力的大型企业加大投入,带动我国核心装备的自主研发和设计制造,可望逐步形成 GW 级的产业规模。目前国内随着产能的增加,环境问题及稀土金属的供需受到重视。因此,如何制备高性能的新型无镉缓冲层替代目前主流的 CdS 缓冲层,以及降低单位产能消耗 In 原材料也是未来产业化需解决的问题。

5) 提升 CIGS 薄膜太阳电池在光伏市场的竞争优势。由于晶体硅的成本低和技术成熟度等优势,光伏市场主要由其垄断。为提升 CIGS 薄膜太阳电池竞争优势,在通过提升技术和增加规模效应降低成本的同时,需要将产品应用多元化,

避免与晶硅产品同质化竞争。应用多样性方面,可偏向于分布式光伏电站、光伏建筑一体化、光伏建材构件等领域;也可利用柔性基底 CIGS 太阳电池可弯曲的特点,将其应用拓宽至背包、幕墙、弧形屋顶、车顶等。

6) CIGS 薄膜光伏技术升级与设备国产化。我国 CIGS 企业关键核心技术与高端装备对外依存度高、高端装备制造业和生产性服务业发展滞后,未来需实现关键核心技术与装备实施国产化攻关,提高关键环节的创新能力,形成薄膜太阳电池技术创新体系,全面提升大面积薄膜半导体材料核心装备的创新能力。

1.4 铜锌锡硫 (CZTS) 基薄膜太阳电池研究进展

1.4.1 CZTS 基薄膜太阳电池发展概况

2014 年,美国 IBM 采用联氨溶液制备的 CZTSSe 太阳电池创造 12.7% 的世界效率纪录^[52]。这一纪录被南京邮电大学辛颖课题组打破,该课题组以 DMSO 为溶剂,以简单的金属盐和硫脲为前驱体化合物,通过优化前驱体里的化学组成,制备出效率为 13.6% 的电池^[53]。此外,越来越多的研究组在 2018 年陆续报道效率超过 11% 的电池。奥尔登堡大学采用直流磁控溅射 Zn/CuSn/Zn 后,使用一步硒化法制备出效率为 11.4% 的 CZTSe 太阳电池^[54]。托莱多大学采用溅射后硒硫化的方法,通过改变后退火过程中腔室的压强,有效地降低了带尾态,制备出效率为 11.8% 的 CZTSSe 太阳电池^[55]。瑞士 EMPA 基于 DMSO 后硒化的方法,通过精确调控 Li 掺杂量获得效率为 11.6% 的 CZTSSe 太阳电池^[56]。中国暨南大学采用磁控溅射后硒化技术制备出效率为 12.3% 的 CZTSe 太阳电池^[57]。(待续)

【参考文献】

- [31] Imec, ZSW and Karlsruhe Institute of Technology. Perovskite/CIGS tandem cell with Record Efficiency of 24.6 percent Paves the Way for Flexible Solar Cells and High-Efficiency Building-Integrated PV[EB/OL]. (2018-09-26), <https://www.azocleantech.com/news.aspx?newsID=25804>.
- [32] BECKY B. Hanergy's Solibro achieves 18.72% CIGS

- module efficiency record[EB/OL]. (2018-09-26), <https://www.pv-magazine.com/2018/02/02/hanergys-solibro-achieves-18-72-cigs-module-efficiency-record/>.
- [33] COLOMBARA D, WERNER F, SCHWARZ T, et al. Sodium enhances indium-gallium interdiffusion in copper indium gallium diselenide photovoltaic absorbers[J]. Nature communications, 2018, 9: 826.
- [34] VILALTA C A, RAGHUWANSHI M, DUGUAY S, et al. Rubidium distribution at atomic scale in high efficient Cu(In, Ga)Se₂ thin-film solar cells[J]. Applied physics letters, 2018, 112: 103 – 105.
- [35] WUERZ R, HEMPEL W, JACKSON P. Diffusion of Rb in polycrystalline Cu(In, Ga)Se₂ layers and effect of Rb on solar cell parameters of Cu(In, Ga)Se₂ thin-film solar cells[J]. Journal of applied physics, 2018, 124: 165305.
- [36] WERNER F, WOLTER M H, SIEBENTRITT S, et al. Alkali treatments of Cu(In, Ga)Se₂ thin-film absorbers and their impact on transport barriers[J]. Progress in photovoltaics: Research and applications, 2018, 26: 911 – 923.
- [37] DONZEL G O, LARSSON F, TÖRND AHL T. Secondary phase formation and surface modification from a high dose KF-post deposition treatment of (Ag, Cu)(In, Ga)Se₂ solar cell absorbers[J]. Progress in photovoltaics: Research and applications, 2019, 27: 220 – 228.
- [38] CHANTANA J, KATO T, SUGIMOTO H, et al. Enhancement of photovoltaic performances of Cu(In, Ga)(S, Se)₂ solar cell through combination of heat - light soaking and light soaking processes[J]. Progress in photovoltaics: Research and applications, 2018, 26: 868 – 876.
- [39] HAN Q, HSIEH Y T, MENG L, et al. High-performance perovskite/Cu(In, Ga)Se₂ monolithic tandem solar cells[J]. Science, 2018, 361: 904 – 908.
- [40] PENG X, ZHAO M, ZHUANG D, et al. Ga₂Se₃ treatment of Cu-rich CIGS thin films to fabricate Cu-poor CIGS thin films with large grains and U-shaped Ga distribution[J]. Vacuum, 2018, 152: 184 – 187.
- [41] PENG X, ZHAO M, ZHUANG D, et al. 10.3%-efficient submicron-thick Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with absorber fabricated by sputtering In₂Se₃, CuGaSe₂ and Cu₂Se targets[J]. Applied surface science, 2018, 442: 308 – 312.
- [42] WEI Y, ZHUANG D, ZHAO M, et al. Fabrication of wide band-gap CuGaSe₂ solar cells for tandem device applications by sputtering from a ternary target and post selenization treatment[J]. Materials letters, 2018, 230: 128 – 131.
- [43] LYU X, ZHUANG D, ZHAO M, et al. An investigation on performance enhancement for KF post deposition treated CIGS solar cells fabricated by sputtering CIGS quaternary targets[J]. Vacuum, 2018, 151: 233 – 236.
- [44] LARSSON F, GARGAND D O, KELLER J, et al. Atomic layer deposition of Zn (O, S) buffer layers for Cu(In, Ga)Se₂ solar cells with KF post-deposition treatment[J]. Solar energy materials and solar cells, 2018, 183: 8 – 15.
- [45] KELLER J, CHEN W C, RIEKEHR L, et al. Bifacial Cu(In, Ga)Se₂ solar cells using hydrogen-doped In₂O₃ films as a transparent back contact[J]. Progress in photovoltaics: Research and applications, 2018, 26: 846 – 858.
- [46] KELLER J, CHALVET F, JOEL J, et al. Effect of KF absorber treatment on the functionality of different transparent conductive oxide layers in CIGSe solar cells[J]. Progress in photovoltaics: Research and applications, 2018, 26: 13 – 23.
- [47] GARGAND D O, THERSLEFF T, KELLER J, et al. Deep surface Cu depletion induced by K in high - efficiency Cu(In,Ga)Se₂ solar cell absorbers[J]. Progress in photovoltaics: Research and applications, 2018, 26: 730 – 739.
- [48] LARSEN K J, KELLER J, LUNDBERG O, et al. Sulfurization of Co-Evaporated Cu(In, Ga)Se₂ as a Postdeposition Treatment[J]. IEEE journal of photovoltaics, 2018, 8: 604 – 610.
- [49] PAUL P, JARMAR T, STOLT L, et al. Role of E_v+0.98 eV trap in light soaking-induced short circuit current instability in CIGS solar cells[EB/OL]. (2018-05-24), <https://arxiv.org/abs/1806.06665>.
- [50] MONICA R. Hanergy's Miasolé completes Europe's biggest thin film solar project in Netherlands[EB/OL]. (2018-09-21), miasole.com/hanergys-miasole-completes-europes-biggest-thin-film-solar-project-in-netherlands/.
- [51] Global Solar Energy. Global Solar Energy announces new PowerFLEX⁺ solar panels[Z]. globalsolar, 2018-07.
- [52] KIM J, HIROI H, TODOROV T K, et al. High efficiency Cu₂ZnSn(S, Se)₄ solar cells by applying a double In₂S₃/CdS emitter[J]. Advanced materials, 2014, 26(44): 7427 – 7431.
- [53] GONG Y C, YU S T, ZHANG Y F, et al. Over 10% efficient copper zinc tin sulfoselenide solar cells from DMSO solution using SnCl₄ as precursor[C]//2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), June 10-15, 2018, IEEE, 2018.
- [54] TASKESSEN T, NEERKEN J, SCHONEBERG J, et al. Device characteristics of an 11.4% CZTSe solar cell fabricated from sputtered precursors[J]. Advanced energy materials, 2018, 8(16): 1703295.
- [55] GANG M G, SHIN S W, SURYAWANSHI M P, et al. Band tail engineering in kesterite Cu₂ZnSn(S, Se)₄ thin-film solar cells with 11.8% efficiency[J]. The journal of physical chemistry letters, 2018, 9(16): 4555 – 4561.
- [56] CABASV A, HAASS S G, ANDRES C, et al. High-efficiency (Li_xCu_{1-x})₂ZnSn(S,Se)₄ kesterite solar cells with lithium alloying[J]. Advanced energy materials, 2018: 1801191.
- [57] 李建军, 尤小辰, 麦耀华. 11.9% 的铜锌锡硒 (CZTSe) 薄膜太阳电池的异质结界面特性研究 [C]// 中国可再生能源学会. 2018 中国可再生能源学术大会. 北京, 2018 – 08.