

文章编号:1006-396X(2023)05-0067-06

投稿网址:http://journal.lnpu.edu.cn

钙钛矿光伏电池封装材料的制备与性能研究

赵鹤鸣¹, 陈丽萍², 魏 奇¹, 于龙娇¹, 杨健松¹, 石富强¹, 王世伟¹

(1. 长春工业大学 化学工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 辽宁省有色地质一〇三队有限责任公司, 辽宁 丹东 118000)

摘 要: 钙钛矿光伏电池具有光电转换效率高、可柔性加工等优势, 被认为是最有应用前景的第三代光伏产品。传统封装材料的高温封装过程很难满足钙钛矿光伏组件高性能化的需求。以丙烯酸酯类单体为原料, 通过自由基共聚合工艺, 成功合成了一种适合钙钛矿光伏电池封装的胶膜材料; 利用红外光谱、拉力试验机等对材料的结构、透光率和黏结特性等进行了表征。结果表明, 该胶膜材料非常适合钙钛矿光伏电池的封装, 可以在 80 °C 实现对钙钛矿太阳能电池(PSCs)和外层玻璃的有效黏结; 封装后 PSCs 光电转换效率可达 20.59%, 并且封装后的 PSCs 器件表现出良好的抗冲击性能。

关键词: 自由基聚合; 钙钛矿光伏电池; 光伏建筑一体化; 封装

中图分类号: TQ152 **文献标志码:** A **doi:**10.12422/j.issn.1006-396X.2023.05.009

Preparation and Properties of Perovskite Photovoltaic Cell Encapsulation Materials

ZHAO Heming¹, CHEN Liping², WEI Qi¹, YU Longjiao¹, YANG Jiansong¹, SHI Fuqiang¹,
WANG Shiwei¹

(1. School of Chemistry and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun Jilin 130012, China;
2. Liaoning Provincial Nonferrous Geology 103 Team Co., Ltd., Dandong Liaoning 118000, China)

Abstract: Perovskite photovoltaic cells are considered as the most promising third generation photovoltaic products due to their high photoelectric conversion efficiency and flexible processing while the high temperature encapsulation process of traditional encapsulation materials can hardly meet the demand of high performance of perovskite photovoltaic modules. In this paper, an adhesive film material by free radical co-polymerization process was successfully synthesized. Light transmission and bonding are characterized by infrared spectroscopy and tensile testing machine, confirming that the polymer is very suitable for chalcogenide photovoltaic cell encapsulation, and that the polymer can be effectively adhered to the chalcogenide solar cell and the outer layer of the glass at 80 °C. The polymer is suitable for the encapsulation of chalcogenide photovoltaic cells. The photoelectric conversion efficiency of the encapsulated PSCs can reach 20.59%, and the encapsulated PSCs devices show good impact resistance.

Keywords: Free radical polymerization; Perovskite photovoltaic cell; Photovoltaic building integrated; Encapsulation

随着全球经济的迅猛发展以及人口数量的增加,化石能源的消耗量不断增加。目前现存的化石能源储备有限,化石能源的消耗不仅加剧了CO₂的排放^[1],而且进一步加剧了温室效应的形成,加快了全球气候变暖的进程^[2-3]。目前,化石能源仍然是电力行业的主要能源^[4-5]。优化电力行业的能源种类对减少碳排放与促进碳达峰、碳中和目标的达成起

到了积极的作用,这需要建立一个以新能源为基础的能源系统^[6-8]。经过多年的不断研究,太阳能电池已经发展到第三代新型高效太阳能电池^[9]。第三代太阳能电池主要包括染料敏化太阳能电池^[10]、有机薄膜太阳能电池^[11]、钙钛矿光伏电池^[12]等,此类太阳能电池器件的理论效率较高,制备工艺相对简单且原料丰富,可以薄膜化,因而得到国内外科研工作

收稿日期:2023-03-19 修回日期:2023-07-20

基金项目:吉林省科技发展计划项目(YDZJ202201ZYTS557, YDZJ202301ZYTS542, 20220508154RC, 20200403142SF, 20210203111SF);长春市科技发展计划项目(21ZY39);国家级大学生创新创业训练项目(202210190028)。

作者简介:赵鹤鸣(2001-),男,硕士研究生,从事钙钛矿光伏电池封装材料方面的研究;E-mail:zhaohemingzhm@163.com。

通信联系人:王世伟(1980-),男,博士,教授,博士生导师,从事光电高分子材料与器件方面的研究;E-mail:wswjldx2004@163.com。

者的一致肯定。

钙钛矿太阳能电池(PSCs)作为第三代新概念太阳能电池,具有高光电转换效率、低成本、可柔性加工等优点^[13],近年来发展迅速,其光电转换效率已经达到 25.5%^[14],可与硅电池媲美。钙钛矿电池已接近商业化应用水平,同时也带动了与钙钛矿电池产业化配套行业的发展^[15-18]。目前实现钙钛矿光伏电池产业应用的关键环节在于电池封装^[19-21],封装材料的性能优劣直接影响光伏组件的整体输出性能和稳定性。从聚合物封装材料性能方面来看,影响 PSCs 封装稳定性的关键因素有 3 方面。一为封装温度。过高的封装温度导致密封过程中产生的热应力会损坏 PSCs,导致封装后的净效率损失。目前封装温度主要集中在 140℃左右,一般配合热稳定性更好的有机-无机杂化钙钛矿,如 Cs⁺掺杂的 MAPbI₃ 薄膜或 FAPbI₃ 薄膜^[22]。二为水蒸气透过率。目前聚异丁烯(PIB)^[23-24]的水蒸气透过率可达 0.15~0.70 g/(m²·d),相较于乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)^[25-26]与环氧树脂^[27],PIB 在阻水性能上拥有巨大优势。需要注意的是,密封剂的封装性能不仅取决于水蒸气的透过率,还取决于密封方法以及各层材料之间的附着力。因此,封装过程中应合理控制器件周围的空隙,空隙过大会促进挥发性物质从钙钛矿中逸出,而空隙过小可能会对 PSCs 器件的活性层造成热损伤。三为封装聚合物的弹性模量。EVA 被广泛应用于 PSCs 封装中,其主要原因是它的弹性模量较低,可以避免在热压封装过程中出现因热膨胀而产生的分层或开裂现象。由于聚烯烃弹性体(POE)弹性模量与 EVA 相近,并且其抗电势诱导衰减(PID)性能优于 EVA,因此被尝试用于器件的封装。但是,其透光率相较沙林树脂与 EVA 低 2%~8%。沙林树脂与 EVA 相比弹性模量高一个数量级,所以在应用过程中很容易因热膨胀而发生分层或开裂现象。在正常工作运行情况下,光伏组件应在上述复杂的环境下持续工作 25~30 年,并且其功率衰减幅度应维持在 20% 以下,这对封装材料提出了更严峻的挑战。选择合适的封装材料和封装工艺是光伏组件长期稳定运行的重要保证,它不仅可以解决钙钛矿光伏器件稳定性问题,还可以满足电池安全、环保、延长使用寿命等要求^[28]。综上所述,研制一种高性能的钙钛矿光伏电池封装材料具有重要的意义。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂:偶氮二异丁腈(AIBN,纯度 98.0%)、聚乙

烯醇(PVA,纯度 99.0%)、丙烯酸(AA,纯度 98.0%)、丙烯酸甲酯(MA,纯度 99.0%)、丙烯酸丁酯(BA,纯度 99.0%),上海阿拉丁试剂有限公司。

仪器:SQP 型电子天平,赛多利斯北京有限公司;DHG-9070A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;DF-1015 型集热式恒温加热磁力搅拌器,长春吉豫科教仪器有限公司;XLB 型平板硫化机,青岛亚华机械有限公司;Universal(2440/750/900)型超级净化手套箱,上海米开罗那机电有限公司;FTM107-A 型高真空蒸发镀膜机,北京微纳真空技术有限公司;6505 型傅里叶变换红外光谱仪,菲尔伯恩精密仪器有限公司;Cary 5000 型紫外可见近红外分光光度计,翱艺仪器(上海)有限公司;QT-6201S 型黏接强度试验机,苏州谦通仪器设备有限公司。

1.2 PAA-MA-BA 样品的制备

选取 AA、BA、MA 三种单体,通过自由基聚合制备 PAA-MA-BA 三元共聚物。

称取一定量的 MA 置于 250 mL 的三口烧瓶中,在 N₂ 气氛下加入少量(约 10 mL)乙醇溶剂,再加入少量抗氧剂和其他助剂,搅拌桨搅拌使其溶解均匀;将 BA 与阻聚剂混合均匀,置于恒压滴液漏斗中;AA 与引发剂混合搅拌均匀,置于另外一个恒压滴液漏斗中;在 N₂ 保护下,两个滴液漏斗同时缓慢滴液于三口烧瓶中,强力搅拌至滴液完全;50℃下继续搅拌 1 h 后,将聚合物液体倒入模具,然后放置烘箱中于 35℃下固化 1 h,得到聚合物薄膜。

1.3 钙钛矿光伏电池的制备

钙钛矿光伏电池器件的结构依次为 FTO/TiO₂/FA_{0.92}Cs_{0.08}PbI₃/Spiro-OMeTAD/Au。器件制备主要按照下面 4 个步骤:①清洗 FTO 玻璃;②制备电子传输层;③制备钙钛矿吸光层;④制备空穴传输层、金电极。

1.4 钙钛矿光伏电池的封装

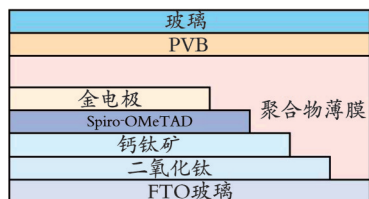
采用热压将按 1.3 中所述方法制备的钙钛矿光伏电池器件进行完全覆盖封装。封装结构采用玻璃/PVB/PAA-MA-BA 聚合物复合封装。在器件上分别放置 PAA-MA-BA 的聚合物薄膜以及 PVB 膜片,最上层用玻璃进行封盖,制成玻璃/PVB/PAA-MA-BA 聚合物/钙钛矿太阳能器件的“三明治”结构,在 80℃的条件下热压 20 min 进行封装。图 1 为钙钛矿电池封装结构。

1.5 器件测试与表征

1.5.1 FT-IR 光谱测试

采用红外光谱仪,通过 ATR 法测试 PAA-MA-

BA 聚合物薄膜样品的红外光谱,扫描范围为 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。



注: Spiro-OMeTAD 代表 2,2',7,7'-四[N,N'-二(4-甲氧基苯基)氨基]-9,9'-螺二芴。

图1 钙钛矿电池封装结构

Fig.1 Package structure of perovskite cells

1.5.2 透光率测试

采用紫外可见近红外分光光度计,在 $360\sim 1\,000\text{ nm}$ 的波长范围内,测试试样的透光率,并绘制了透光率-波长($T-\lambda$)曲线。参考 GB/T 2410—2008,通过式(1)计算每个试样的可见光透光率(T)。

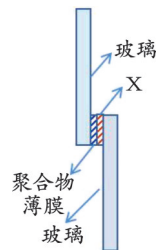
$$T = \frac{T_{555} + T_{700} + T_{900}}{3} \quad (1)$$

式中: T_{555} 、 T_{700} 和 T_{900} 分别表示在波长为 555、700、900 nm 处试样的透光率。

1.5.3 黏接性能测试

参考 GB/T 7124—2008,在温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对

湿度为 35%、拉伸速率为 5 mm/min 的条件下,用黏接强度试验机测试试样的剪切强度。图 2 为样品的黏接剪切强度测试示意图。



注: X 代表聚乙醇醇缩丁醛(PVB)、碘化铅(PbI_2)、窄带隙无甲铵钙钛矿(PVK)、金(Au)、玻璃(Glass)、Spiro-OMeTAD。

图2 样品的黏接剪切强度测试示意图

Fig.2 Scheme of the adhesive shear strength test

1.5.4 抗冲击测试

用落球冲击试验机对封装前后钙钛矿光伏电池的抗冲击性能进行测试。将 50 g 的钢球在 60 cm 高度处自由落下,垂直冲击封装好的钙钛矿光伏电池器件与未经封装器件,反复 3 次,观察其破碎情况。

2 结果与讨论

2.1 PAA-MA-BA 的 FT-IR 光谱分析

用 FT-IR 光谱对三元聚合物进行了表征,结果如图 3 所示。

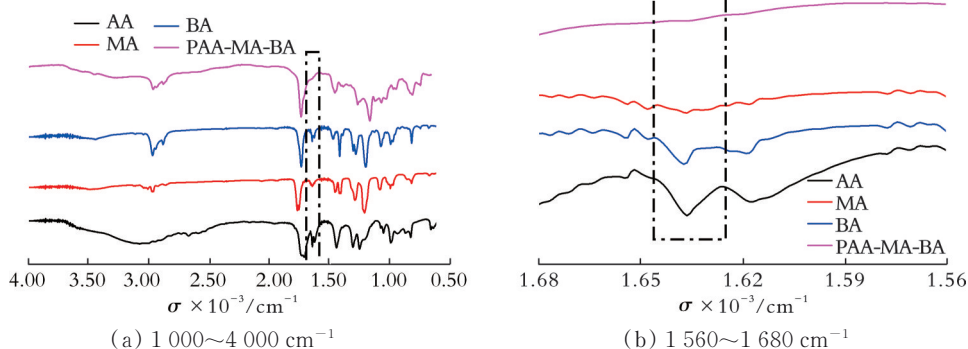


图3 PAA-MA-BA 的 FT-IR 谱图

Fig.3 FT-IR spectra of PAA-MA-BA

由图 3 可知, $2\,958$ 、 $2\,932$ 、 $2\,873\text{ cm}^{-1}$ 处出现了甲基和亚甲基的对称伸缩振动吸收峰; $1\,729\text{ cm}^{-1}$ 处出现了羧酸中羰基的伸缩振动峰; $1\,448\text{ cm}^{-1}$ 处出现了一 CH_3 的弯曲振动吸收峰。 $1\,637\text{ cm}^{-1}$ 处并没有出现 $\text{C}=\text{C}$ 的伸缩振动峰,同时 $890\sim 910\text{ cm}^{-1}$ 处 $\text{C}-\text{H}$ 没有出现面外弯曲振动吸收峰,表明共聚物体系中不存在 $\text{C}=\text{C}$,说明该聚合反应实现了单体共聚,没有单体残余。可见,合成了目标产物 PAA-MA-BA。

2.2 PAA-MA-BA 的透光率

AA 的折射率为 1.422, MA 的折射率为 1.402,

BA 的折射率为 1.417。通过计算可得, AA 反射率为 0.030, MA 的反射率为 0.028, BA 的反射率为 0.030。反射率越小,透光率越大,透明性越好。图 4 为不同 AA 质量分数的 PAA-MA-BA 聚合物透光率。由图 4 可知,随着 AA 质量分数的增加,透光率逐渐上升。根据式(1)计算可得,当 AA 质量分数为 0、4%、7%、10% 时,聚合物的透光率分别为 82.86%、83.58%、83.94%、84.67%。当可见光的波长为 $400\sim 760\text{ nm}$ 时,透光率最大可达 90.28%。透光率测试结果表明, PAA-MA-BA 聚合物的透光率可以满足钙钛矿电池的封装要求。

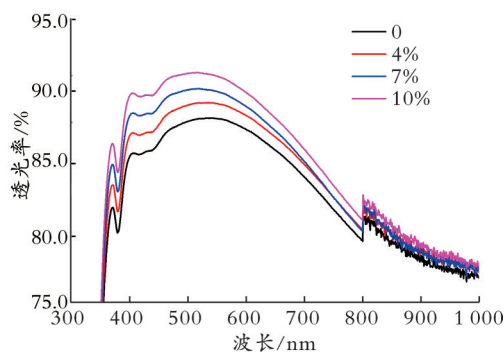
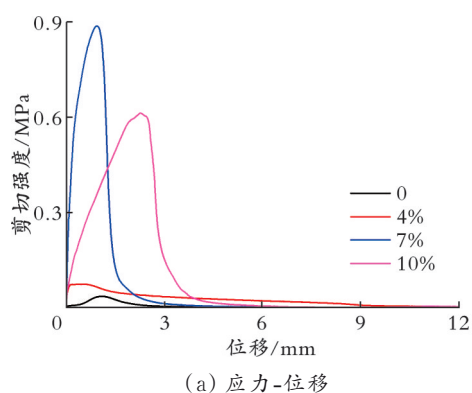


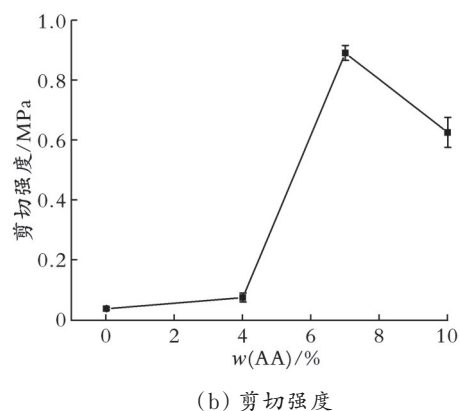
图4 不同AA质量分数的PAA-MA-BA聚合物透光率

Fig.4 Light transmittance of PAA-MA-BA polymer with different AA mass fraction

2.3 PAA-MA-BA 黏接性能



(a) 应力-位移



(b) 剪切强度

图5 不同AA质量分数的PAA-MA-BA聚合物黏接玻璃的应力-位移和剪切强度曲线

Fig.5 Shear strength curves and stress-displacement curves of PAA-MA-BA polymer bonding glass with different AA mass fraction

由图6可知, PVB、 PbI_2 、Spiro-OMeTAD、PVK、Al、Glass黏接强度分别为0.85、0.79、0.72、1.03、0.79、0.89 MPa,表明其对钙钛矿器件中各层材料均表现出较为优异的黏接性能,进一步证实了其作为钙钛矿光伏封装材料的可行性。

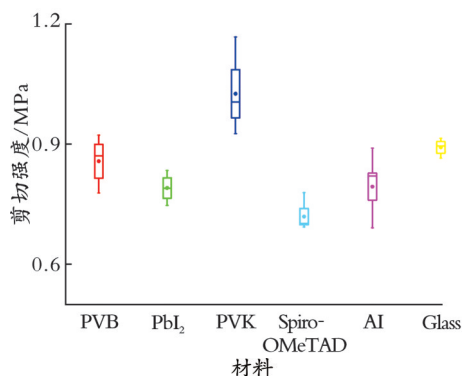


图6 AA质量分数为7%的PAA-MA-BA聚合物与钙钛矿各层材料剪切强度

Fig.6 Shear strength of PAA-MA-BA polymer with mass fraction 7% AA and perovskite layers

2.4 PSCs封装效率分析

综上所述,从剪切强度角度考虑,PAA-MA-BA是一种较为理想的钙钛矿电池封装材料。但是,从电池效率考虑,热压封装后是否会对电池效率产生影响仍需要进一步测试。

对封装好的钙钛矿太阳能器件进行了效率测试。图7为封装前后钙钛矿光伏电池的J-V曲线。

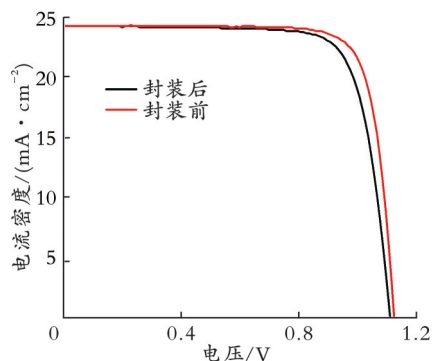


图7 封装前后钙钛矿光伏电池J-V曲线

Fig.7 J-V curves of perovskite solar cells before and after encapsulation

在太阳能转换系统标准测试光谱 AM 1.5 G、辐照功率为 100 mW/cm² 的光照射下的光伏性能参数如表 1 所示,表中结果是 20 个电池的平均值。从封装前后钙钛矿光伏电池的效率对比可以看出,封装后钙钛矿光伏电池器件相较于封装前仍可以保持初始 P_{CE} 的 93.3%,平均效率降低幅度仅为 1.47%,封装后器件平均效率可达 20.59%。测试结果表明,PAA-MA-BA 可以适用于钙钛矿器件的封装。

表 1 钙钛矿光伏电池光伏性能参数
Table 1 Photovoltaic performance parameters of perovskite solar cells

PSCs	$J_{sc}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	V_{oc}/V	F	$P_{CE}/\%$
封装前	24.28	1.15	0.79	22.06
封装后	24.51	1.12	0.75	20.59

注: J_{sc} 指光伏电池的短路电流; V_{oc} 指光伏电池的开路电压; F 指光伏电池的填充因子; P_{CE} 指光伏电池的光电转化效率。

2.5 PSCs封装器件抗冲击性能

对 PAA-MA-BA 聚合物和 PVB 膜复合封装后的钙钛矿光伏电池器件进行了抗冲击测试,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,落球冲击后试样满足 GB/T 9656—2003 的要求,钢球未穿透试样,试样没有断成几块;使用玻璃/PVB/聚合物复合封装后器件的抗冲击性能有了明显的提升;钢球对玻璃产生冲击后,没有玻璃碎片的脱落与飞溅,很好地保持了器件的完整性;裂纹从冲击中心向边缘四周扩散,裂纹普遍在内部蔓延,最终形成放射线状裂纹,最终

玻璃碎片仍黏结在聚合物膜和 PVB 膜上,并未脱落。这一结果证明复合封装的封装效果较好,同时也说明这种复合封装方式具有一定的应用价值。

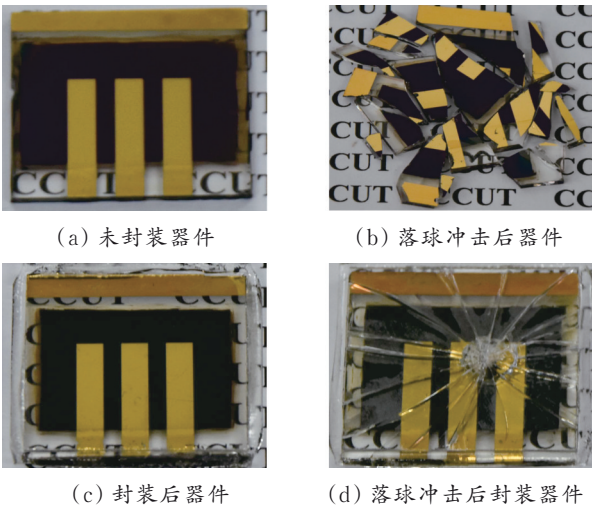


图 8 抗冲击测试结果
Fig.8 Impact resistance test results

3 结 论

通过自由基共聚合工艺成功制备了 PAA-MA-BA 三元共聚物;利用其优异的剪切强度(0.89 MPa)和透光率(90.28%),将该聚合物应用于钙钛矿光伏电池器件的封装,并详细研究了其封装工艺。结果表明,采用 PAA-MA-BA 封装的钙钛矿器件具有优异的抗冲击特性,封装器件具有较高的安全性;可在低温条件(80 ℃)下对器件进行封装,避免高温封装损伤器件。

参 考 文 献

[1] LI H Z, LI B K, LU H. Carbon dioxide emissions, economic growth, and selected types of fossil energy consumption in China: Empirical evidence from 1965 to 2015[J]. Sustainability, 2017, 9(5): 697.

[2] DARKWAH W K, ODUM B, ADDAE M, et al. Greenhouse effect: Greenhouse gases and their impact on global warming [J]. Journal of Scientific Research and Reports, 2018, 17(6): 1-9.

[3] 康旭东, 穆海林, 桂树森, 等. 亚洲地区能源-经济-环境系统模型研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2010, 23(4): 94-98.

KANG X D, MU H L, GUI S S, et al. Asian energy-environment-economic system model[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2010, 23(4): 94-98.

[4] 李亚飞. 低碳经济背景下电力行业节能减排路径研究[J]. 科技经济市场, 2021(4): 89-90.

LI Y F. Research on energy conservation and emission reduction path of power industry under the background of low-carbon economy[J]. Keji Jingji Shichang, 2021(4): 89-90.

[5] 王红岩, 李景明, 赵群, 等. 中国新能源资源基础及发展前景展望[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 469-474.

WANG H Y, LI J M, ZHAO Q, et al. Resources and development of new energy in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 469-474.

[6] 苗安康, 袁越, 吴涵, 等. “双碳”目标下绿色氢能技术发展现状与趋势研究[J]. 分布式能源, 2021, 6(4): 15-24.

MIAO A K, YUAN Y, WU H, et al. Research on development status and trend of green hydrogen energy technologies under targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. Distributed Energy, 2021, 6(4): 15-24.

[7] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.

HU A G. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.

- [8] 苏剑峰,牛强,唐春娟,等.新颖的第三代太阳能电池[J].材料导报,2010,24(15):118-121.
SU J F, NIU Q, TANG C J, et al. Novel third-generation solar cells[J]. Materials Reports, 2010, 24(15): 118-121.
- [9] DEVADIGA D, SELVAKUMAR M, SHETTY P, et al. Recent progress in dye sensitized solar cell materials and photo-supercapacitors: A review[J]. Journal of Power Sources, 2021, 493: 229698.
- [10] XING C C, LEI Y, LIU M Y, et al. Environment-friendly Cu-based thin film solar cells: Materials, devices and charge carrier dynamics[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2021, 23(31): 16469-16487.
- [11] YOO J J, WIEGHOLD S, SPONSELLER M C, et al. An interface stabilized perovskite solar cell with high stabilized efficiency and low voltage loss[J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(7): 2192-2199.
- [12] FROST J M, BUTLER K T, BRIVIO F, et al. Atomistic origins of high-performance in hybrid halide perovskite solar cells[J]. Nano Letters, 2014, 14(5): 2584-2590.
- [13] 徐明,孙兆林,陈永昌,等.钙钛矿电子结构的密度泛函理论研究[J].石油化工高等学校学报,2011,24(2):40-42.
XU M, SUN Z L, CHEN Y C, et al. Density functional theory study of perovskite with electronic structure[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2011, 24(2): 40-42.
- [14] JEONG J, KIM M, SEO J, et al. Pseudo-halide anion engineering for α -FAPbI₃ perovskite solar cells[J]. Nature, 2021, 592(7854): 381-385.
- [15] YANG S, CHEN S S, MOSCONI E, et al. Stabilizing halide perovskite surfaces for solar cell operation with-bandgap lead oxysalts[J]. Science, 2019, 365(6452): 473-478.
- [16] WANG L G, ZHOU H P, HU J N, et al. A Eu^{3+} - Eu^{2+} ion redox shuttle imparts operational durability to Pb-I perovskite solar cells[J]. Science, 2019, 363(6424): 265-270.
- [17] TAN H R, JAIN A, VOZNY O, et al. Efficient and stable solution-processed planar perovskite solar cells via contact passivation[J]. Science, 2017, 355(6326): 722-726.
- [18] BAI S, DA P M, LI C, et al. Planar perovskite solar cells with long-term stability using Ionic liquid additives[J]. Nature, 2019, 571(7764): 245-250.
- [19] BONOMO M, TAHERI B, BONANDINI L, et al. Thermosetting polyurethane resins as low-cost, easily scalable, and effective oxygen and moisture barriers for perovskite solar cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(49): 54862-54875.
- [20] PARK H H. Inorganic materials by atomic layer deposition for perovskite solar cells[J]. Nanomaterials, 2021, 11(1): 88.
- [21] SAMADPOUR M, HEYDARI M, MOHAMMADI M, et al. Water repellent room temperature vulcanized silicone for enhancing the long-term stability of perovskite solar cells[J]. Solar Energy, 2021, 218: 28-34.
- [22] LEE J W, KIM D H, KIM H S, et al. Formamidinium and cesium hybridization for photo- and moisture-stable perovskite solar cell[J]. Advanced Energy Materials, 2015, 5(20): 1501310.
- [23] SHIMAN D I, SAYEVICH V, MEERBACH C, et al. Robust polymer matrix based on isobutylene (Co) polymers for efficient encapsulation of colloidal semiconductor nanocrystals[J]. ACS Applied Nano Materials, 2019, 2(2): 956-963.
- [24] KEMPE M D, PANCHAGADE D, REESE M O, et al. Modeling moisture ingress through polyisobutylene-based edge-seals[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2015, 23(5): 570-581.
- [25] CHEACHAROEN R, BOYD C C, BURKHARD G F, et al. Encapsulating perovskite solar cells to withstand damp heat and thermal cycling[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2018, 2(11): 2398-2406.
- [26] HUANG Z Q, HU X T, LIU C, et al. Water-resistant and flexible perovskite solar cells via a glued interfacial layer[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(37): 1902629.
- [27] ASLAN E, ATES TURKMEN T, ALTURK E. High stability perovskite solar cells under ambient conditions[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(16): 3160-3163.
- [28] WERTHEN J G, FAHRENBRUCH A L, BUBE R H, et al. Surface preparation effects on efficient indium-tin-oxide-CdTe and CdS-CdTe heterojunction solar cells[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(5): 2750-2756.

(编辑 闫玉玲)