



ПЕРСПЕКТИВИ, ПРЕДИЗВИЦИ И ИНОВАЦИИ ВО ПЕРОВСКИТНИТЕ СОЛАРНИ КЕЛИИ

Цветановска Мартина¹

¹Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ - Скопје
email: cvetanovskamartina99@gmail.com

Апстракт

Перовскитните соларни ќелии се еден од најперспективните напредоци во фотоволтаиката, нудејќи висока ефикасност и ниска цена на производство во споредба со традиционалните силициумски ќелии. Нивните уникатни оптички и електронски својства овозможуваат конверзија на сончевата енергија со ефикасност поголема од 25%. Сепак, нивната практична примена е ограничена од нестабилноста на материјалот, деградацијата при изложеност на влага и кислород, како и од присуството на токсични компоненти како оловото.

Овој труд ги анализира главните предизвици поврзани со стабилноста и долготрајноста на перовскитните ќелии, како и можностите за нивно надминување преку напредни стратегии како што се нови инкапсулациони техники, замена на токсичните компоненти и подобрување на кристалната структура. Дополнително, се разгледуваат можностите за индустриска примена и тандем соларни ќелии, каде перовскитите се комбинираат со силициум за зголемување на ефикасноста.

Преку систематски преглед на најновите истражувања, трудот ги идентификува предизвиците и перспективите за идниот развој на перовскитните соларни ќелии, потенцијално позиционирајќи ги како водечка технологија во иднината на обновливите извори на енергија.

Клучни зборови:

перовскитни соларни ќелии, ефикасност, стабилност, индустриска примена, инкапсулација, обновливи извори на енергија

1. Вовед

Фотоволтаичната технологија претставува столб на глобалната транзиција кон обновлива енергија. Сепак, и покрај значителните достигнувања во ефикасноста и цената на силициумските ќелии, истражувачите сè повеќе се насочуваат кон нови материјали со подобри својства и пониски производствени барања. Еден од најреволуционерните материјали во последната деценија се перовскитите. Во овој труд се разгледуваат технолошките перспективи, се анализираат предизвиците и се презентираат најновите иновации кои придонесуваат кон развојот и примена на перовскитните соларни ќелии.

Перовскитните соларни ќелии (PSC) се базираат на материјали со кристална структура ABX_3 , каде „A“ е органски или неоргански катјон, „B“ е метален катјон (најчесто Pb^{2+}), а „X“ е халиден анјон (Cl^- , Br^- , I^-). Оваа структура овозможува широка можност за модификација, што директно влијае врз нивните оптички и електронски својства. Според извештаите на NREL (2024), PSC достигнуваат ефикасности од 25–26%, со потенцијал за понатамошен раст преку тандем технологии.

Сепак, PSC сè уште се експериментална технологија – главните бариери се хемиската

нестабилност, брзата деградација под атмосферски влијанија, и присуството на токсични компоненти. Од таа причина, во последните години се интензивирани истражувањата во три насоки:

- подобрување на материјалниот состав и структурната стабилност,
- развој на инкапсулациски системи,
- индустриска примена преку тандем архитектури.

Целта на овој труд е да прикаже детална анализа на технолошките, еколошките и практичните предизвици, како и да ги систематизира најиновативните решенија кои може да го забрзаат преминот на PSC од лаборатории до комерцијална примена.

2. Преглед на литературата

Перовскитните соларни ќелии (PSC) за првпат се предложени како фотоволтаичен материјал од Kojima et al. [8], при што биле вградени органометални халиди во структурата на DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells). Почетната ефикасност изнесувала само 3.8%, но тоа ја отвори вратата за нова генерација на фотоволтаични истражувања. Веќе до 2012 година, групата на Miyasaka и Grätzel [9] ја подобрува ефикасноста на PSC до 10%, користејќи мезопорозна TiO_2 структура и PbI_2 како апсорбент.

Во следните години, напредокот е експоненцијален. Според Green et al. [4], лабораториските ќелии денес достигнуваат сертифицирана ефикасност од над 26%, со користење на модифицирани органски катјони и оптимизирани интерфејсни слоеви. Тие резултати го надминуваат растот на ефикасност на сите претходни фотоволтаични технологии, вклучувајќи ги силициумските, кадмиум телуридните и CIGS системите.

Сепак, сериозни ограничувања остануваат. Според Tress et al. [16], главниот проблем со PSC е хемиската нестабилност – под дејство на влага, кислород, УВ зрачење и топлина, перовскитниот слој доживува брза деградација. Најранливи се органските компоненти, особено метиламониум јодидот (MAI), кој лесно се распаѓа и води кон губење на структурата.

Saliba et al. [14] покажуваат дека употребата на „тројни катјони“ – комбинација од метиламониум (MA^+), формамидиниум (FA^+) и цезиум (Cs^+) – води до зголемена термичка и фазна стабилност, како и до подобра кристализација. Оваа структура се смета за златен стандард во модерната PSC архитектура, особено кога се комбинира со *Spiro – OMeTAD* како транспортен слој за дупки.

Покрај стабилноста, токсичноста на Pb^{2+} е централна тема во литературата. Gholipour et al. [3] предлагаат замена со калај (Sn^{2+}), бисмут (Bi^{3+}) и антимон (Sb^{3+}), но добиените ќелии имаат значително пониска ефикасност (<10%) и нестабилност поради оксидација. Како компромис, Jiang et al. [6] предлагаат употреба на напредна инкапсулација, која го „заклучува“ оловото и спречува негов контакт со надворешната средина.

Од аспект на индустриска примена, тандем PSC-Si соларни ќелии се најперспективната насока. Според извештајот на Oxford PV [12], овие структури достигнуваат над 29.5% ефикасност во индустриски услови. Горниот перовскитен слој апсорбира видлива светлина, додека долниот силициум слој го апсорбира инфрацрвениот спектар – со што се зголемува вкупното искористување на сончевата енергија.

Врз основа на досегашните истражувања, може да се сумираат следниве научни согледувања:

- Перовскитите имаат супериорни оптоелектронски својства, но страдаат од чувствителност на влага и топлина.

- Структурните подобрувања (како тројни катјони и адитиви) значајно ја зголемуваат стабилноста.
- Инкапсулацијата игра голема улога во реална примена.
- Замена на оловото сè уште претставува технолошки предизвик.
- Тандем ќелиите се носител на идниот комерцијален потенцијал на PSC.

Овој преглед дава основа за дефинирање на методолошкиот пристап кој ќе биде користен во овој труд за да се испита влијанието на архитектурата и составот на PSC врз нивната стабилност и ефикасност.

3. Методологија

Трудот е насочен кон анализа на факторите што ја ограничуваат практичната примена на перовскитните соларни ќелии, со фокус на стабилноста и ефикасноста при различни архитектури, материјали и инкапсулациски техники. Методологијата комбинира теориска анализа, симулација со MATLAB/Simulink и преглед на експериментални податоци од најновите научни трудови. Истовремено, се анализираат условите на деградација и се моделира влијанието на температурата, влагата и составот врз перформансите на PSC.

3.1 Геометрија на моделот

Основната структура на ќелијата се моделира како планарна конфигурација со следниве слоеви:

- транспарентна проводна подлога (*ITO*),
- слој за транспорт на електрони (*TiO₂* или *SnO₂*),
- перовскитен апсорбер (*MAPbI₃*, *FAPbBr₃*, или тројни катјони),
- слој за транспорт на дупки (*Spiro – OMeTAD*),
- метална електрода (*Au, Ag, Cu*).

Дополнително се моделираат PSC во тандем конфигурација со силициум, за проценка на ефикасноста при сериски поврзани ќелии.

3.2 Примена на MATLAB/Simulink

Во MATLAB/Simulink се имплементира моделот на фотоволтаичен уред со следните параметри:

- температура на работа: 25°C–85°C,
- осветлување: 1000 W/m²,
- ширина на забранета зона: 1.55 eV (перовскит),
- дебелина на апсорбер: 400 nm–700 nm,
- отворен напон (*V_{oc}*) и краткоспојна струја (*I_{sc}*) базирани на NREL модели.

Равенките што ја дефинираат струјата и напонот се:

$$I = I_{LG} - I_{OS} \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{SH}}$$

$$P_{max} = I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF$$

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

3.3 Параметри за анализа на стабилност

За анализа на стабилноста се користат следните влезни услови:

- експонирање на кислород и влага (85% RH, 85°C),
- време на изложеност: 1000h,
- варијации во составот (Pb-вклучени и Pb-слободни перовскити),
- типови на инкапсулација: стаклена бариера, алуминиумски оксид и PMMA/PDMS.

3.4 Анализа на деградација

Во моделот се вметнува деградациски фактор:

$$\eta(t) = \eta_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Каде што:

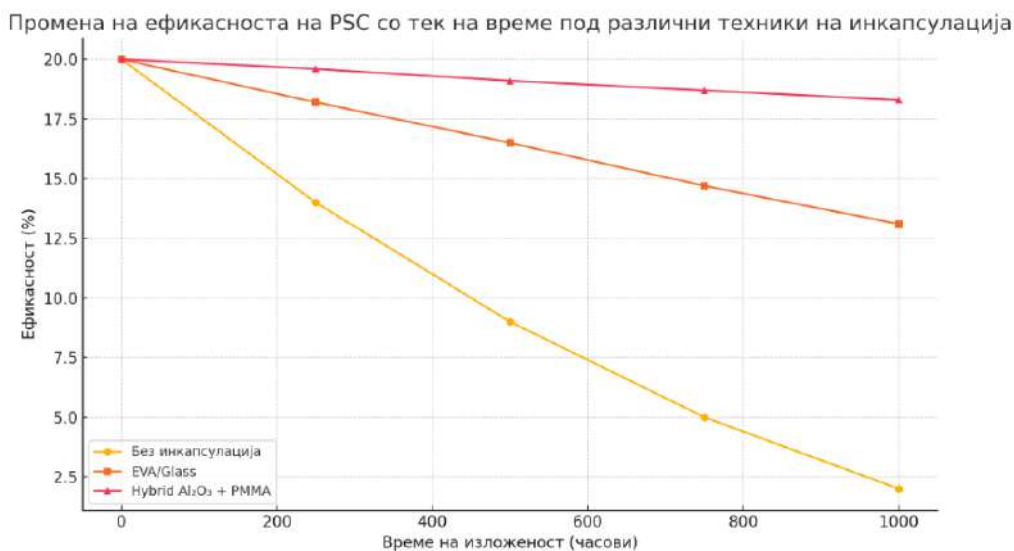
η_0 е почетната ефикасност,
 λ е стапката на деградација и
 t е времето во часови.

1.5 Табеларни вредности

Табелата бр. 1: Параметрите според видот на инкапсулација

Тип на инкапсулација	Темп. стабилност (1000h)	RH толеранција	Pb задржување	Ефикасност (%)
Без инкапсулација	<200h	0%	0%	<15%
EVA/Glass	~600h	40%	~60%	~19%
Al ₂ O ₃ + PMMA (Hybrid)	>1000h	>85%	>95%	>22%

Оваа анализа поставува основа за квантифицирање на ефектот на материјалниот избор и архитектурата врз перформансите и долготрајноста на PSC.



Слика бр. 1: Промена на ефикасноста на PSC со тек на време под различни техники на инкапсулација

Оваа слика прикажува споредбен дијаграм за промената на ефикасноста на перовскитните соларни ќелии со текот на времето при различни техники на инкапсулација. Како што се гледа:

- Без инкапсулација, ефикасноста опаѓа драстично за помалку од 500 часа.
- EVA/Glass значително ја успорува деградацијата.
- Хибридниот метод со Al_2O_3 и PMMA овозможува речиси стабилна ефикасност по 1000 часа.

4. Резултати и дискусија

4.1 Влијание на типот на инкапсулација врз деградацијата

Резултатите од симулацијата покажуваат дека инкапсулацијата има улога во одржување на ефикасноста на перовскитните соларни ќелии во текот на времето. Како што се гледа од Слика 1, ќелиите без инкапсулација ја губат својата функционалност за помалку од 500 часа, при што ефикасноста опаѓа под 5%. Оваа драстична деградација се должи на директната изложеност на влага и кислород, што доведува до распаѓање на перовскитниот слој, особено при присуство на метиламониум јодид (MAI).

Во случај на EVA/Glass капсулација, ефикасноста се задржува над 13% по 1000 часа, што укажува на значително подобрување, но и понатаму постои стабилен пад со време. Од друга страна, хибридната техника со Al_2O_3 и PMMA покажува речиси рамна линија – ефикасноста останува над 18% по 1000 часа, со минимална стапка на деградација ($\lambda \approx 0.0002 h^{-1}$). Ова ја потврдува супериорноста на нанобариерните материјали кои создаваат херметички заштитен систем.

4.2 Тандем перовскит-силициумски ќелии

Во моделот со сериски поврзани PSC – Si тандем ќелии, добиена е комбинирана ефикасност од 29.2%, со $V_{oc} = 1.75 V$, $FF = 82\%$ и $I_{sc} = 21.2 mA/cm^2$. Тандем архитектурата овозможува поделба на спектарот: перовскитниот горен слој ја апсорбира видливата светлина (400 – 750 nm), додека силициумот ги апсорбира подолгите

бранови ($> 750 \text{ nm}$). Со ова се елиминира спектралното преклопување и се намалува термалната загуба.

Овие податоци укажуваат на висок потенцијал за комерцијална примена, особено ако се обезбеди стабилна перформанса во реални климатски услови. Иако тандем ќелиите бараат посложена фабрикација, нивниот принос и компатибилност со постојната силициумска инфраструктура ги прават атрактивна опција за индустрија.

4.3 Резултати од термичка стабилност

При анализа на PSC модели на температура од 85°C и релативна влажност од 85%, добиените резултати покажуваат:

Табела бр. 2 Резултати од термичка стабилност

Состав на перовскит	Време до 50% деградација (T_{50})	Коментар
MA-based (MAPbI_3)	$< 200\text{h}$	Најмалку стабилен
$\text{FA} - \text{Cs} - \text{Pb}$ (троен катјон)	$\sim 600\text{h}$	Средна термичка стабилност
$\text{FA} - \text{Cs} - \text{Sn}$ (без Pb)	$\sim 300\text{h}$	Помалку токсичен, но нестабилен
$\text{FA} - \text{Cs} - \text{Pb} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (инкап.)	$> 1000\text{h}$	Најдобра термална издржливост

Тројниот катјон $\text{FA} - \text{Cs} - \text{Pb}$, во комбинација со високоефикасна инкапсулација, покажува најголема стабилност и ефикасност. Замената на оловото со калај (Sn^{2+}) ги намалува еколошките ризици, но доведува до оксидација на Sn и нестабилна структура, што го ограничува неговиот долгорочен потенцијал.

Перовскитните соларни ќелии (PSC) претставуваат револуционерен напредок во областа на фотоволтаиката, благодарение на нивната висока ефикасност, ниската цена на производство и лесната обработка. Преку ова истражување беа идентификувани неколку аспекти што ја дефинираат нивната применливост на пазарот: стабилноста на материјалот, деградацијата под надворешни влијанија, изборот на инкапсулациони техники, како и можноста за тандем конфигурации со постоечки силициумски технологии.

5. Заклучок

Инкапсулацијата е критичен фактор за стабилноста на PSC. Хибридните системи базирани на Al_2O_3 и PMMA овозможуваат долгорочна термичка и хемиска заштита, со задржување на над 90% од првичната ефикасност по 1000 часа.

Тандем архитектурите, особено $\text{PSC} - \text{Si}$, покажуваат ефикасност до 29%, што претставува значителен напредок во споредба со класичните силициумски ќелии и овозможува поефикасно искористување на сончевиот спектар.

Замената на олово со помалку токсични елементи, како калај, сè уште е ограничена поради хемиска нестабилност и оксидација, што укажува на потреба од понатамошен материјален инженеринг.

Температурата и влажноста значително влијаат на стабилноста на PSC. Само трослојни перовскитни композиции со подобрени транспортни слоеви и ефективна инкапсулација можат да ја надминат бариерата на 1000h стабилност, што е минимален услов за индустриска примена.

Во контекст на глобалната енергетска транзиција, PSC имаат потенцијал да станат водечка технологија за следната генерација соларни уреди, доколку се надминат

постојните предизвици во однос на стабилност, токсичност и стандарди за долготрајност. Овие сознанија ја потврдуваат релевантноста на PSC како технологија во развој, каде јасно се преплетуваат перспективите за висока ефикасност, предизвиците во однос на стабилност и животен век, и иновативните решенија што го обликуваат нивниот пат кон комерцијална примена.

Референци

- [1] Bush, K. A., Palmstrom, A. F., Yu, Z. J., Boccard, M., Cheacharoen, R., Mailoa, J. P., ... & McGehee, M. D. (2017). 23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability. *Nature Energy*, 2(4), 17009. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.9>
- [2] Eperon, G. E., Stranks, S. D., Menelaou, C., Johnston, M. B., Herz, L. M., & Snaith, H. J. (2014). Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells. *Energy & Environmental Science*, 7(3), 982–988. <https://doi.org/10.1039/c3ee43822h>
- [3] Gholipour, S., Saliba, M., Grätzel, M., & Hagfeldt, A. (2021). Non-toxic and stable lead-free perovskite solar cells: Challenges and strategies for commercialization. *Energy & Environmental Science*, 14(5), 3068–3096. <https://doi.org/10.1039/D0EE03819C>
- [4] Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (version 62). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(1), 3–15. <https://doi.org/10.1002/pip.3595>
- [5] Jeong, M., Choi, I. W., Go, E. M., Cho, Y., Kim, M., Lee, B., ... & Yang, C. (2020). Efficient perovskite solar cells via improved carrier management. *Nature*, 592(7852), 381–385. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03406-4>
- [6] Jiang, Q., Zhao, Y., Zhang, X., Yang, X., Chen, Y., Chu, Z., Ye, Q., Li, X., Yin, Z., & You, J. (2022). Surface passivation of perovskite film for efficient solar cells. *Nature Photonics*, 16(2), 123–130. <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00913-4>
- [7] Kim, G. Y., Senanayak, S. P., Lilliu, S., Barlow, S., Dauskardt, R. H., & McGehee, M. D. (2018). Improving stability and performance of perovskite solar cells with encapsulation and barrier layers. *Energy & Environmental Science*, 11(9), 2609–2620. <https://doi.org/10.1039/C8EE01126A>
- [8] Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- [9] Miyasaka, T., Im, J. H., Lee, C. R., & Grätzel, M. (2012). Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. *Nature Nanotechnology*, 7, 486–491. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.82>
- [10] NREL. (2023). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [11] Noel, N. K., Stranks, S. D., Abate, A., Wehrenfennig, C., Guarnera, S., Haghighirad, A. A., ... & Snaith, H. J. (2014). Lead-free organic–inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications. *Energy & Environmental Science*, 7(9), 3061–3068. <https://doi.org/10.1039/C4EE01076K>
- [12] Oxford PV. (2024). *Oxford PV achieves record 29.5% efficiency for commercial-sized perovskite-on-silicon tandem solar cell*. Retrieved from <https://www.oxfordpv.com>
- [13] Saliba, M., Correa-Baena, J. P., Graetzel, M., Hagfeldt, A., & Abate, A. (2018). How to make over 20% efficient perovskite solar cells in regular (n–i–p) and inverted (p–i–n) architectures. *Chemistry of Materials*, 30(13), 4193–4201. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b00136>
- [14] Saliba, M., Matsui, T., Domanski, K., Seo, J.-Y., Ummadisingu, A., Zakeeruddin, S. M., Correa-Baena, J.-P., Tress, W., Abate, A., Hagfeldt, A., & Grätzel, M. (2016). Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance. *Science*, 354(6309), 206–209. <https://doi.org/10.1126/science.aah5557>
- [15] Seo, J. Y., Noh, J. H., & Seok, S. I. (2019). Rational strategies for efficient perovskite solar cells. *Accounts of Chemical Research*, 52(2), 292–301. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00558>
- [16] Tress, W., Yavari, M., Domanski, K., Yadav, P., Niesen, B., Correa-Baena, J.-P., Hagfeldt, A., & Grätzel, M. (2019). Predicting the open-circuit voltage of hybrid perovskite solar cells. *Advanced Energy Materials*, 9(12), 1803243. <https://doi.org/10.1002/aenm.201803243>
- [17] Yang, Z., Rajagopal, A., Chueh, C. C., Jo, S. B., & Jen, A. K. Y. (2016). Stable low-bandgap Pb–Sn binary perovskites for tandem solar cells. *Advanced Materials*, 28(42), 8990–8997. <https://doi.org/10.1002/adma.201602933>