



भारतीय वैज्ञानिक एवं औद्योगिक अनुसंधान पत्रिका  
वर्ष 30 अंक (2) दिसम्बर 2022 पृ. 65–70  
DOI: 10.56042/bvaap.v28i2.53944



## उच्च दक्षता पेरोवस्काइट-सिलिकॉन अनुबद्ध सौर सेल

नमन शुक्ला, धरम लाल एवं संजय तिवारी  
स्कूल ऑफ स्टडीज इन इलेक्ट्रॉनिक्स एंड फोटोनिक्स  
पं. रविशंकर शुक्ल विश्वविद्यालय, रायपुर 492 010 (छत्तीसगढ़)

### सारांश

साधारण संविरचन तकनीक के साथ-साथ सौर ऊर्जा को विद्युत ऊर्जा में परिवर्तित करने की उच्च दक्षता से सुसज्जित पेरोवस्काइट-सिलिकॉन अनुबद्ध सौर प्रौद्योगिकी को सौर ऊर्जा के क्षेत्र में एक आकर्षक और संभावनापूर्ण विकल्प के रूप में देखा जा रहा है। एक से अधिक संधि (junction) वाले पेरोवस्काइट-सिलिकॉन अनुबद्ध सौर सेल (perovskite-Si tandem solar cell) संरचना में कार्यदक्षता एकल संधि सौर सेल की प्रायोगिक दक्षता सीमा से अधिक प्राप्त करते हैं। कार्बनिक-अकार्बनिक लेड हैलाइड पेरोवस्काइट फोटोवोल्टीय प्रौद्योगिकी से उच्च कार्य क्षमता की रिपोर्ट की गयी है। कम लागत, साधारण एवं सरल निर्माण तकनीक से बना हुआ पेरोवस्काइट सौर युक्ति बहुत हल्की, लचीली व अर्ध-पारदर्शी विशेषताओं से निहित है। यह सौर सेल नये सबस्ट्रेट पर निर्माण की अनुकूलताओं एवं सामग्रियों के चौड़े पटल मुद्रण से परिपूर्ण होने के कारण औद्योगिकीकरण हेतु उपर्युक्त है। हालांकि पेरोवस्काइट में तापीय अस्थिरता और नमी संवेदनशीलता अभी भी सिलिकॉन की तुलना में अत्यधिक है। अनुबद्ध संरचना में पेरोवस्काइट सक्रिय अवशोषक परत ऊपर तथा सिलिकॉन तत्व नीचे रहता है, जिसका बैंड अंतराल क्रमशः 1.54 eV, 1.12 eV है। दो दशक के समयोपरांत भी प्रचलित सिलिकॉन सौर सेल प्रौद्योगिकी की दक्षता अधिकतम लगभग 26% पर अटकी हुई है। इसी समस्या के समाधान के लिए पेरोवस्काइट-सिलिकॉन अनुबद्ध सौर सेल एक विकल्प के रूप में संभावित है। पेरोवस्काइट-सिलिकॉन अनुबद्ध सौर सेल का प्रकाशीय एवं विद्युतीय अध्ययन स्कैप्स-1डी (SCAPS-1D) अनुकारी तकनीक से किया गया है। अनुबद्ध सौर सेल संरचना TCO/TiO<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>/PEDOT:PSS/c-Si(n)/c-Si(p)/c-Si BSF(p<sup>+</sup>)/Ag में खुला परिपथ वोल्टेज 1.56 V, लघु परिपथ करंट घनत्व 23.7 mA/cm<sup>2</sup>, फिल फैक्टर 84.76% एवं सौर स्पेक्ट्रम के फिल्टरीकरण के पश्चात् 30.7% दक्षता प्राप्त की गयी है। अनुबद्ध सौर सेल में सिलिकॉन एवं पेरोवस्काइट परत की मोटाई से कार्य प्रदर्शन पर पड़ने वाले प्रभाव का भी अध्ययन किया गया है।

## High performance perovskite-silicon tandem solar cells

Naman Shukla, Dharam Lal & Sanjay Tiwari

School of Studies in Electronics and Photonics  
Pt. Ravishankar Shukla University, Raipur 492 010 (Chhattisgarh)

### Abstract

Equipped with simple fabrication and efficient technique of converting solar energy into electricity, perovskite-silicon tandem solar technology is being seen as an attractive and promising option in the field of solar energy. Perovskite-Si tandem solar cell structures with multiple junctions achieve efficiency higher than the experimental efficiency limits of a single p-n junction solar cell. Even after two decades, the efficiency of the prevailing silicon solar cell technology is stuck at a maximum of about 26%. Perovskite-silicon tandem solar cells are a possible alternative to this problem. High efficiency is recently reported by using organic-inorganic lead halide perovskite. Perovskite solar device made from low cost and simple manufacturing process, possess inherent characteristics like light in weight, flexible, semi-transparent etc. The thermal instability and moisture sensitivity in perovskite materials are still under-performed when compared to silicon materials. The numerical simulation of perovskite-Si tandem solar cells has been performed. The perovskite active absorber layer is placed at the top and the silicon at the bottom, with band gaps of 1.54 eV, 1.12 eV respectively. The optical and electrical studies of perovskite-silicon tandem solar cells have been done using SCAPS-1D simulation technique. Tandem solar cell structure TCO/TiO<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>/PEDOT:PSS/c-Si(n)/c-Si(p)/c-SiBSF(p<sup>+</sup>)/Ag has open circuit voltage 1.56 V, short circuit current density 23.7mA/cm<sup>2</sup>, Fill factor is 84.76% and efficiency is 30.7% (after filtration of solar spectrum). The effect of thickness of silicon and perovskite layer on performance in tandem solar cell has also been studied.

### प्रस्तावना

राष्ट्रीय अर्थव्यवस्था में कार्बन फुटप्रिंट्स को कम करने व विभिन्न क्षेत्रों में ऊर्जा आवश्यकताओं की निर्बाध आपूर्ति हेतु अक्षय ऊर्जा प्रौद्योगिकी एक सुनहरा विकल्प बन चुका है। इसी क्रम में, भारत सरकार ने वर्ष 2022 के अंत तक 175 गीगावाट अक्षय ऊर्जा क्षमता विकसित करने का महत्वाकांक्षी लक्ष्य भी बनाया है। इसमें सौर ऊर्जा द्वारा 100 गीगावाट (GW) तक के उत्पादन क्षमता को स्थापित करना प्रस्तावित है। देश के लगभग सभी राज्यों में सौर विकिरण की प्रचुर मात्रा में उपलब्धता के कारण सौर ऊर्जा एक मुख्य घटक है। प्रकृति में प्रचुर मात्रा में उपलब्धता, उत्कृष्ट स्थिरता व विषैलारहित गुणों से निहित सिलिकॉन आधारित सौर सेल अभी प्रायः सभी जगह उपयोग में लाया जा रहा है। इसका मुख्य कारण प्रकाश ऊर्जा को विद्युत् ऊर्जा में परिवर्तित करने की उच्च दक्षता और तकनीकी परिपक्वता के साथ-साथ अच्छी गुणवत्ता का होना है। एकल संधि सिलिकॉन सौर सेल से लगभग 26% की दक्षता प्राप्त की गयी है<sup>1</sup>। शॉकले किज़र सीमा (Shockley-Queisser limit) के अनुसार एक आदर्श एकल p-n संधि सिलिकॉन सौर सेल से अधिकतम लगभग 30% कार्य दक्षता प्राप्त की जा सकती है<sup>2</sup>। गत एक दशक से एकल p-n संधि सौर सेल में दक्षता की प्रतिशतता अधिकतम आंकलित की गई है जोकि प्रायोगिक दक्षता के निकट पहुँच जाने के कारण संतृप्त हो गया है। एक से अधिक संधि वाले अनुबद्ध सौर सेल (tandem solar cell) संरचना में कार्यदक्षता इस सीमा से मुक्त है। अतएव अनुबद्ध सौर सेल में दक्षता 30% से अधिक प्राप्त कर सकते हैं। वर्तमान में, पेरोवस्काइट सौर सेल से उच्च कार्य क्षमता की रिपोर्ट की गयी है<sup>1</sup>। उच्च दक्षता, साधारण एवं कम लागत निर्माण (fabrication) तकनीक से सुसज्जित पेरोवस्काइट सौर सेल की विशेषताएं जैसे उच्च अवशोषण गुणांक (High Absorption Coefficient) (लगभग  $105^{cm^{-1}}$ )<sup>3,4</sup> अधिक लंबाई का विसरण (large diffusion Length)<sup>5</sup> इलेक्ट्रॉन व होल की अधिक परिवहन दूरी (long transport distance of electrons and holes) और बैंड अंतराल परिवर्तनशीलता<sup>6</sup> है। विभिन्न पेरोवस्काइट सामग्रियों में, कार्बनिक-अकार्बनिक हैलाइड में सामान्य अणु फार्मूला (molecular formula)  $ABX_3$  है, जहां A एक कार्बनिक धनायन (organic cation) जैसे  $CH_3NH_3$ , B एक धातु धनायन (metal cation) (जैसे  $Sn^{2+}$  or  $Pb^{2+}$  इत्यादि) और X एक हैलोजन ऋणायन (जैसे  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Br^-$  or  $I^-$  इत्यादि) है<sup>7</sup>। अनुबद्ध सौर सेल के लिए सिलिकॉन व पेरोवस्काइट सौर सेल एक दुसरे के अनुकूल एवं आदर्श सौर सेल मानकों के गुणों पर खरा उतरते हैं। अनुबद्ध संरचना में पेरोवस्काइट सक्रिय अवशोषक

परत ऊपर तथा सिलिकॉन नीचे रहता है। पेरोवस्काइट का बैंड अंतराल क्रमशः 1.54 eV है जो सौर स्पेक्ट्रम के अधिक ऊर्जा वाले फोटॉन भाग पर कार्य करेगा एवं नीचे स्थित 1.12 eV बैंड अंतराल के साथ सिलिकॉन कम ऊर्जा वाले फोटॉन भाग पर सक्रिय रहेगा। इस संरचना में ऊपर स्थित कम तापमान पर विलेय संसाधित पेरोवस्काइट सौर सेल पारदर्शी भी है। इसीलिए इसे सिलिकॉन के साथ अनुबद्ध संरचना में प्रयोग करके अधिकतम दक्षता के स्तर को आसानी से प्राप्त कर सकते हैं। हालांकि उच्च तापमान, अल्ट्रावायलेट विकिरण और नमीयुक्त वातावरण में पेरोवस्काइट सौर सेल पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ता है और सेल की कार्य दक्षता व स्थिरता में कमी आती है<sup>8</sup>। इसकी दक्षता के साथ-साथ स्थिरता में वृद्धि हेतु विश्वभर में वैज्ञानिकों, शोधार्थियों द्वारा कार्य किया जा रहा है। निदर्शन एवं अनुकार द्वारा सौर सेल के इष्टतम कार्यान्वयन को सुनिश्चित किया जाता है। प्रकाशीय एवं विद्युतीय निदर्शन से ही परत की मोटाई, दोष घनत्व (defect density), अपमिश्रण घनत्व (doping density) का इष्टतम परिमाण का निर्धारण होता है। तथा साथ ही तत्वों के चयन हेतु भी यह तकनीक सहायक है। इस शोध पत्र में, स्कैप्स-1डी (SCAPS-1D) अर्थात् सौर सेल धारिता अनुकार (Solar Cell Capacitance Simulator) सॉफ्टवेयर द्वारा पेरोवस्काइट-सिलिकॉन अनुबद्ध सौर सेल का अध्ययन व विश्लेषण किया गया है। मूल अर्धचालक समीकरणों, प्वासों एवं सांतत्य समीकरणों एवं अन्य परिवहन घटकों की सीमाओं को सम्मिलित करके हल निकालने पर स्कैप्स-1 डी द्वारा परिणाम प्राप्त होता है<sup>9,10</sup>। इस अनुबद्ध सौर सेल में, दो सौर सेल को एक के ऊपर एक अर्थात् स्टैक फॉर्म में रखा गया है। उच्च ऊर्जा बैंड अन्तराल (High Energy Band gap) के सौर सेल को ऊपर तथा कम बैंड अन्तराल ऊर्जा वाले सौर सेल को उसके नीचे व्यवस्थित रखते हैं। सर्वप्रथम जब प्रकाश अग्र सौर सेल (front solar cell) अर्थात् ऊपर स्थित सौर सेल से होकर जाता है तो अधिक ऊर्जा वाले फोटॉन अवशोषित होते हैं तथा शेष कम ऊर्जा वाले फोटॉन निम्न तल स्थित सौर सेल (back solar cell) में अवशोषित होते हैं। अन्य शब्दों में, जैसा चित्र-2 में दर्शाया गया है कि प्रकाश सर्वप्रथम पेरोवस्काइट सौर सेल के पारदर्शी इलेक्ट्रोड से होकर पेरोवस्काइट सक्रिय परत पर जाती है तो अवशोषित होकर इलेक्ट्रॉन-होल (electron and hole charge) जोड़े बनाती है। इस प्रक्रिया में, लघु तरंगदैर्घ्य (short wavelength) भाग लेते हैं। कम बंधन ऊर्जा (low binding energy) के कारण इलेक्ट्रॉन व होल अलग-अलग संबंधित आवेश परिवहन परत (charge transport layer) के माध्यम से इलेक्ट्रोड तक पहुँचते हैं। तत्पश्चात् प्रकाश इस पारदर्शी सौर सेल के बाद नीचे की

तरफ दूसरे सौर सेल में अवशोषित होती है। इस सेल में वृहत तरंगदैर्घ्य (longer wavelength) का अवशोषण होता है। इलेक्ट्रॉन व होल क्रमशः ऊपर स्थित व निम्नतल स्थित इलेक्ट्रॉड में अलग-अलग एकत्र हो जाते हैं। अग्र सौर सेल में पेरोवस्काइट परत पारदर्शी होने के कारण प्रकाश आसानी से सिलिकॉन सौर सेल तक भी जाता है। और इस प्रकार अनुबद्ध सौर सेल से सौर स्पेक्ट्रम के अलग-अलग भाग के ऊर्जा का अवशोषण होता है।

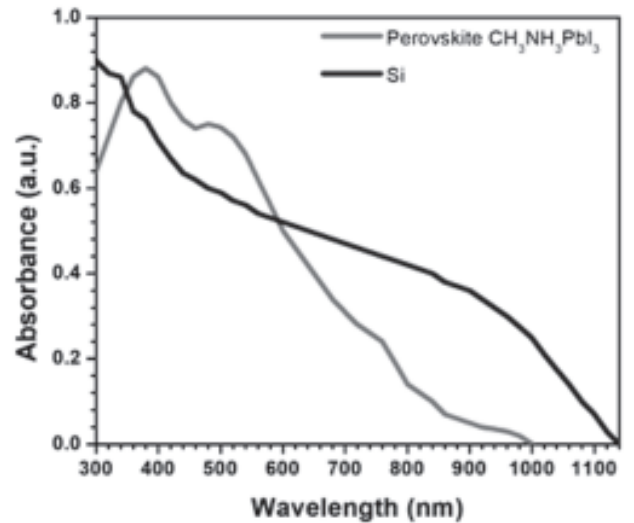
### अनुबद्ध सौर सेल: परिभाषा, प्रकार एवं संरचना

एकल संधि सौर सेल में अच्छे अवशोषक व संकरे बैंड ऊर्जा अन्तराल के सक्रीय परत से उच्च खुला परिपथ वोल्टेज ( $V_{oc}$ ) नहीं उत्पन्न किया जा सकता है। एकल संधि सौर सेल में  $E_g/q$  द्वारा  $V_{oc}$  सीमित हो जायेगा ( $E_g$  अवशोषक का बैंड अन्तराल एवं  $q$  आवेश है)<sup>2</sup>। यही कारण है कि संकरे बैंड ऊर्जा से उच्च  $V_{oc}$  नहीं प्राप्त कर सकते हैं। यद्यपि अवशोषक के चौड़े बैंड ऊर्जा अन्तराल से उच्च  $V_{oc}$  उत्पन्न कर सकते हैं, लेकिन लघु परिपथ करंट सिमित हो जायेगा। लघु परिपथ करंट के एक सीमा तक ही बढ़ने का कारण यह है कि अधिकांश फोटॉन इसमें अपनी भागीदारी नहीं दे पाएंगे, जिनकी ऊर्जा अवशोषक के ऊर्जा बैंड अन्तराल से कम होगी। अनुबद्ध संरचना से उच्च  $V_{oc}$  के साथ-साथ अधिक लघु परिपथ करंट प्राप्त कर सकते हैं। संकरे बैंड ऊर्जा अन्तराल तथा चौड़े बैंड ऊर्जा अन्तराल अवशोषक से बने सौर सेलों को एक के ऊपर एक रखते हैं। यही कारण है कि इस पूर्ण सौर सेल को अनुबद्ध सौर सेल के रूप में जाना जाता है, जिसमें ऊपर स्थित सौर सेल और नीचे स्थित सौर सेल सम्मिलित है। अनुबद्ध सौर सेल मुख्यतः दो टर्मिनल और चार टर्मिनल संरचना (configuration) में रखा जाता है। चार टर्मिनल वाले अनुबद्ध सौर सेल में दोनों उप-सौर सेल के मध्य यांत्रिकीय जोड़ होता है। जबकि दो टर्मिनल अनुबद्ध सौर सेल के उदाहरण के लिए जैसा की चित्र 2 (अ) में दिखाया गया है, पेरोवस्काइट सौर सेल का निर्माण सिलिकॉन आधारित सौर सेल के ऊपर किया जाता है। अर्थात् उप-सौर सेलों में आंतरिक जुड़ाव होता है। अनुबद्ध सौर सेल में सिलिकॉन के साथ पेरोवस्काइट उपयोग करने पर सैधान्तिकीय दक्षता का प्रतिशत लगभग 40% से अधिक अनुमानित है। परन्तु अभी व्यावहारिक प्रयोगात्मक अभ्यास में लाने पर कई सारे अवांछनीय कारकों के कारण सीमित दक्षता लगभग 29% रिपोर्ट की गयी है<sup>1</sup>। दक्षता कम होने के प्रमुख कारण श्रेणी व सामानांतर प्रतिरोधकता क्षय, आंतरिक परतों में अवशोषण एवं अन्य प्राकृतिक घटकों की प्रभावी उपस्थिति है। जैसा चित्र-2 में दर्शाया गया है कि प्रकाश एक पेरोवस्काइट सौर

सेल (अग्र सौर सेल) के पारदर्शी इलेक्ट्रॉड से पेरोवस्काइट सक्रीय परत पर अवशोषित होकर इलेक्ट्रॉन-होल युग्म बनते हैं। इलेक्ट्रॉन एवं होल आवेश कम बंधन ऊर्जा (low binding energy) के कारण अलग होकर क्रमशः इलेक्ट्रॉन व धनात्मक आवेश परिवहन परत (electron and hole charge transport layer) के माध्यम से संबंधित इलेक्ट्रॉड में एकत्रित हो जाते हैं। कृत्रिम AM 1.5 के 100 mW/cm<sup>2</sup> की प्रकाश तीव्रता के मानक में प्राप्त J-V अभिलक्षणन परिणाम को चित्र 4 में प्रदर्शित किया गया है।  $CH_3NH_3PbI_3$  आधारित पेरोवस्काइट सौर सेल में इलेक्ट्रॉन आवेश परिवहन को सुगम बनाने हेतु  $TiO_2$  व धनात्मक आवेश परिवहन के लिए PEDOT : PSS के पतली परत का प्रयोग किया गया है<sup>11</sup>। युक्ति में पेरोवस्काइट सक्रीय परत की मोटाई 500 नैनोमीटर,  $TiO_2$  एवं PEDOT:PSS की मोटाई क्रमशः 70 नैनोमीटर एवं 35 नैनोमीटर है। सिलिकॉन सौर सेल में p प्रकार के डोपन क्रिस्टल सिलिकॉन वेफर की मोटाई 244 माइक्रोमीटर है तथा c-Si(n), c-Si BSF (p<sup>+</sup>) की मोटाई क्रमशः 0.05 व 0.03 माइक्रोमीटर है।

### परिणाम एवं विवेचना

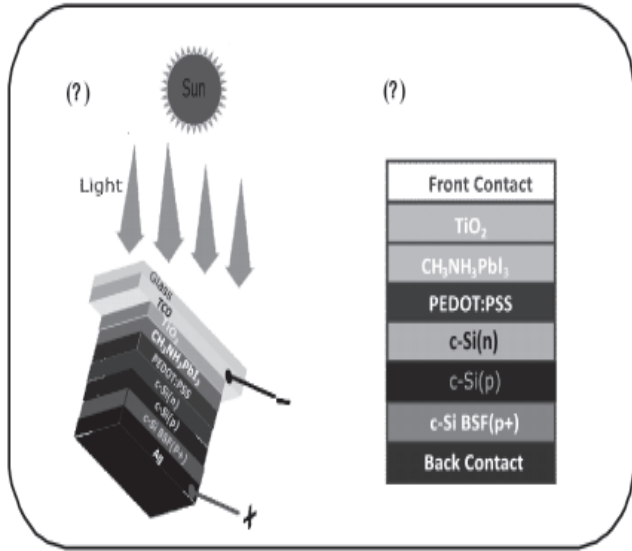
सौर सेल द्रव्यों के अच्छे प्रकाश ऊर्जा अवशोषण क्षमता से उत्कृष्ट दक्षता का निर्धारण होता है। इस शोध पत्र में, पेरोवस्काइट-सिलिकॉन अनुबद्ध सौर सेल का निदर्शन एवं अभिलक्षणन का अध्ययन किया गया है। चित्र-1 अवशोषण स्पेक्ट्रा, सिलिकॉन व पेरोवस्काइट सामग्री द्वारा सौर स्पेक्ट्रम रेंज



चित्र 1 – पेरोवस्काइट एवं सिलिकॉन का अवशोषण स्पेक्ट्रा

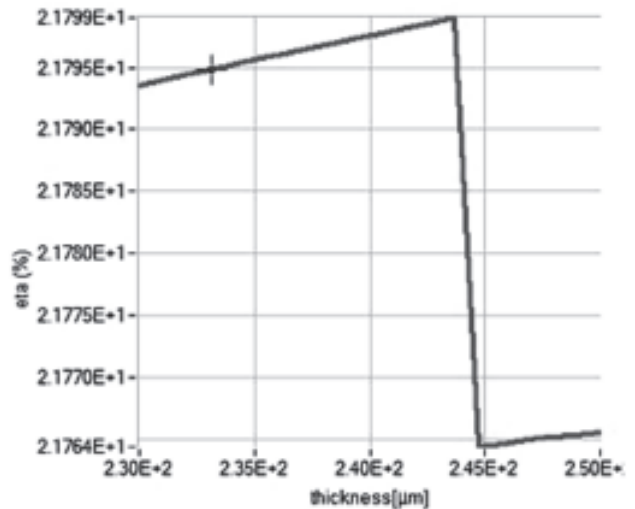
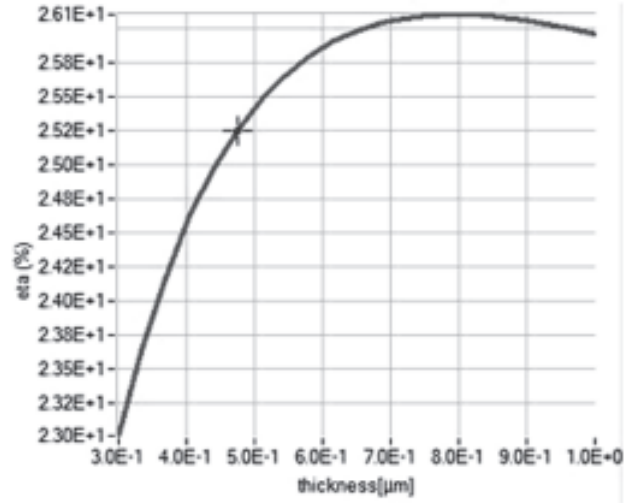
में उच्च प्रकाश ऊर्जा अवशोषण की पुष्टि करता है। इसमें सिलिकॉन द्वारा बृहत तरंगदैर्घ्य (longer wavelength) की प्रभावी अवशोषण क्षमता भी प्रदर्शित हो रही है। चित्र 2 (अ) और (ब) में सौर सेल युक्ति और सौर सेल संरचना को स्पष्ट दिखाया गया है। अनुकारी तकनीक द्वारा पेरोवस्काइट, सिलिकॉन और पेरोवस्काइट- सिलिकॉन अनुबद्ध सौर सेल से प्राप्त परिणाम सारणी 1 में उल्लेखित है। युक्ति के इष्टतम कार्यान्वयन हेतु पेरोवस्काइट एवं सिलिकॉन की अलग-अलग मोटाई पर दक्षता का अवलोकन किया गया है। इसकी अलग-अलग मोटाई पर दक्षता को क्रमशः चित्र 3 (अ) और (ब) में दिखाया गया है।

युक्ति के J-V अभिलक्षणन से प्रकाशीय ऊर्जा के विद्युतीय ऊर्जा में रूपांतरण का अध्ययन किया जाता है, चित्र- 4 में दिखाया गया है। पेरोवस्काइट सौर सेल युक्ति की संरचना n-i-p प्रकार की है। अनुबद्ध सौर सेल संरचना TCO/TiO<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>/PEDOT:PSS/c-Si(n)/c-Si(p)/c-Si BSF(p+)/Ag में खुला परिपथ वोल्टेज (Voc) 1-56 V, लघु परिपथ करंट घनत्व (Isc) 23.7 mA/cm<sup>2</sup>, फिल फैक्टर (FF) 84.76% एवं



चित्र 2 – (अ) सौर युक्ति, (ब) सौर युक्ति संरचना

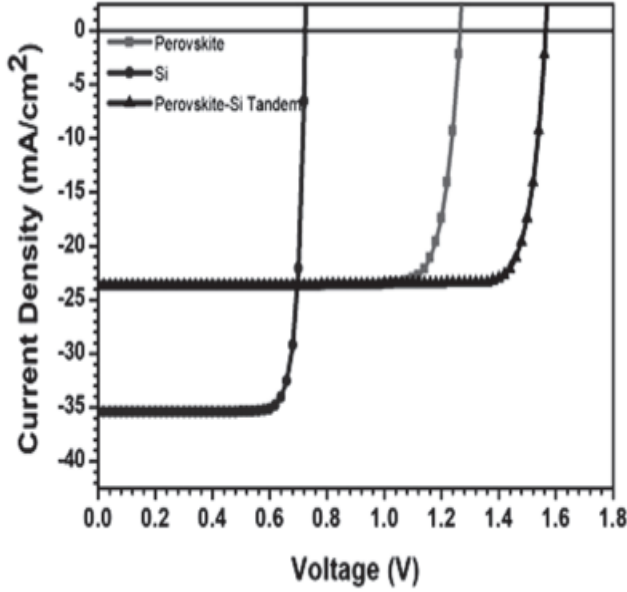
सौर स्पेक्ट्रम के फिल्टरीकरण के पश्चात् 30.7% दक्षता प्राप्त की गयी है। चित्र 5 में क्वांटम दक्षता को प्रदर्शित किया गया है। क्वांटम दक्षता उन फोटॉन की प्रतिशतता को दर्शाता जिनके द्वारा सेल लघु परिपथ स्थिति में विद्युत करंट उत्पन्न करता है। यह अनुकारी परिणाम प्रयोगात्मक रूप में सौर सेल निर्माण हेतु महत्वपूर्ण तथ्य प्रदान करते हैं।



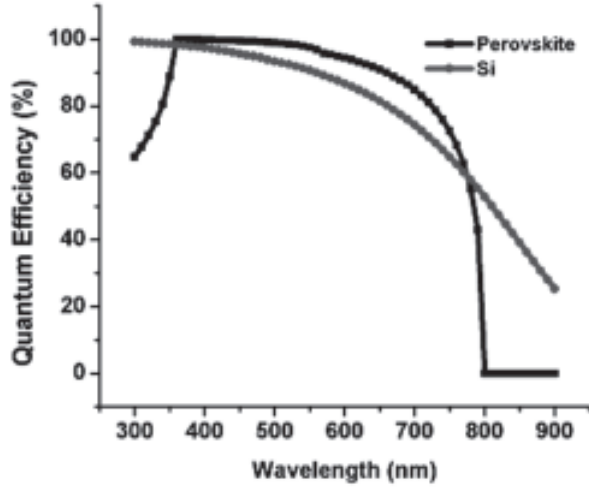
चित्र 3 – (अ) पेरोवस्काइट परत के अलग-अलग मोटाई पर दक्षता, (ब) सिलिकॉन के मोटाई परिवर्तन से दक्षता पर प्रभाव

सारणी 1 – पेरोवस्काइट, सिलिकॉन और पेरोवस्काइट-सिलिकॉन अनुबद्ध सौर सेल से प्राप्त परिणाम

सौर सेल	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	फिल फैक्टर (%)	दक्षता (%)
पेरोवस्काइट	1.26	23.7	84.77	25.4
सिलिकॉन	0.72	35.4	84.87	21.8
पेरोवस्काइट-सिलिकॉन	1.56	23.7	84.77	30.7



चित्र 4 – पेरोवस्काइट, सिलिकॉन एवं पेरोवस्काइट-सिलिकॉन का J-V अभिलक्षणन



चित्र 5 – पेरोवस्काइट एवं सिलिकॉन का क्वांटम दक्षता ग्राफ

### निष्कर्ष

पेरोवस्काइट-सिलिकॉन अनुबद्ध सौर सेल का प्रकाशीय एवं विद्युतीय अभिलक्षणन का अध्ययन व विश्लेषण स्कैप्स-1 डी अनुकारी तकनीक से किया गया है। सिलिकॉन प्रौद्योगिकी के साथ पेरोवस्काइट सौर सेल का प्रयोग करने पर अवशोषण क्षमता में वृद्धि एक बहुत अच्छी तकनीक के रूप में उभरी है। सौर सेल बनाने में सामान्य से बड़े क्षेत्रफल में पेरोवस्काइट के क्रिस्टल संरचना को बनाये रखने, युक्ति की गुणवत्ता को सिलिकॉन प्रौद्योगिकी के समकक्ष लाने और कम लागत में सहज उपलब्धता

इत्यादि कार्य चुनौतीपूर्ण है। पेरोवस्काइट-सिलिकॉन प्रौद्योगिकी के कार्यक्षमता को अधिक वर्षों तक कायम रखना भी आवश्यक है। लेड का प्रयोग इसके औद्योगिकीकरण में बाधक बन सकता है, इसलिए इसके विकल्प पर भी निरंतर शोध कार्य हो रहे हैं। चार टर्मिनल पेरोवस्काइट-सिलिकॉन अनुबद्ध सौर सेल के दोनों पेरोवस्काइट और सिलिकॉन सौर सेल को अलग-अलग करके भी प्रयोग संभव है। घर में अन्दर लगे हुए प्रकाश स्रोतों से प्राप्त कम तीव्र एवं विसरित (diffuse) प्रकाश में भी पेरोवस्काइट सौर सेल कार्य करता है। अतएव इसका अनुप्रयोग अन्य सभी स्थानों जैसे घर के अन्दर खिड़कियों, दीवारों पर भी संभव है। इंटरनेट ऑफ थिंग्स से संबंधित यन्त्र में आवश्यक ऊर्जा की आपूर्ति भी इससे संभव है। पेरोवस्काइट सौर सेल पतले, लचीले और कम मूल्य के कारण अधिकतर जगहों में सौर ऊर्जा का उपयोग करने का अधिक अवसर पैदा करता है। यह सभी अनुप्रयोग पेरोवस्काइट सौर सेल के औद्योगिकीकरण से होने वाले अनेक संभावित लाभों को इंगित करते हैं। सौर सेल में समतल संरचना वाले परत के कारण प्रकाश अवशोषण कम होता है। अतः कई परिष्कृत डिजाइनों के प्रयोग से इसे बढ़ाया भी जा सकता है। सरल और व्यावहारिक संरचनाओं वाले डिजाइन को प्रकाश अवशोषित करने के सभी प्रासंगिक पहलुओं को ध्यान में रखकर बनाया जाना चाहिए। भविष्य में, सौर पैनल की दक्षता को बढ़ाने के लिए पहले से लगे सिस्टम (सिलिकॉन आधारित सौर पैनल) में पेरोवस्काइट मॉड्यूल को जोड़कर प्रकाश ऊर्जा अवशोषण अधिक किया जा सकता है। यद्यपि पेरोवस्काइट मॉड्यूल को सिलिकॉन आधारित सौर पैनल से जोड़ने के विषय में अन्य तकनीक जैसे नम्य डिजाइन, इलेक्ट्रिकल एवं यांत्रिकीय कार्य इत्यादी भी आवश्यक और चुनौतीपूर्ण है।

### सन्दर्भ

1. नेशनल रेनेवबेल एनर्जी लेबोरेटरी, बेस्ट रिसर्च सेल इफिशिएंसीज।
2. शॉकले डब्ल्यू, किजर एच जे, जर्नल ऑफ एप्लाइड फिजिक्स 32 (1961) 510।
3. ग्रीन एम, होबैल्ली ए, स्नैथ एच, नेचर फोटॉन 8 (2014) 506-514.
4. कृष्णा बी, राठौर जी, शुक्ला एन, तिवारी एस, हाइब्रिड पेरोवस्काइट कंपोजिट मटेरियल, वुडहेड पब्लिशिंग (2021) 375-412।
5. स्ट्रेंक्स एस डी, एपेरोन जी इ, ग्रान्सिनी जी, मेनेलाऊ सी, अल्कोसर एम जे पी, लेइजेंट्स टी, हेर्ज़ एल एम, पेत्रोजा एम, स्नैथ एच जे, साइंस 342 (2013) 341-344।

6. एपेरोन जी इ, स्ट्रेंक्स एस डी, मेनेलाऊ सी, जॉनस्टॉन, हेर्ज एल एम, स्नैथ एच जे, एनर्जी एनवायरनमेंट साइंस 7 (2014), 982-988।
7. गिओर्गी, जी, फुजिसावा जे., सेगावा एच, यामशिता के, द जर्नल ऑफ़ फिजिकल केमिस्ट्री लेटर्स 4 (2013) 4213-4216.
8. लीज्टेन्स टी, एपेरोन जी इ, पाठक एस, अबेट ए, ली एम एम एवं स्नैथ एच जे, नेचर कम्युनिकेशन 4 (2013) 2885.
9. बर्गेलमैन एम, नोल्लेट पी., डेग्रेव एस, थिन सॉलिड फिल्म्स 361-362 (2000) 527-532.
10. बर्गेलमैन एम, डेकॉक के, खेलिफी एस, एबास ए, थिन सॉलिड फिल्म 535 (2013) 296-301.
11. तिवारी एस, याख्मी जे वी, कार्टर एस, स्कॉट जे सी, हेंडबुक ऑफ़ इकोमैटेरियल्स, नेचर स्प्रीन्गर (2018) 1-36.