



सौर कोशिकाएँ और उनकी नवीनतम प्रगति: स्वच्छ ऊर्जा की दिशा में एक वैज्ञानिक अध्ययन

प्रियंका सिंह*

भौतिकी एवं पदार्थ विज्ञान विभाग, मदन मोहन मालवीय प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय, गोरखपुर, उ०प्र०, भारत-273010

लेखक से संवाद के लिए ईमेल*- priyankasonamsingh@gmail.com

आलेख प्राप्त: ०७ फरवरी २०२६; अंतिम संशोधन: १९ फरवरी २०२६; स्वीकृत: १९ फरवरी २०२६

प्रथम ऑनलाइन प्रकाशित: १८ मार्च २०२६

सारांश

प्रस्तुत शोध पत्र सौर कोशिकाओं की भौतिकी, कार्य सिद्धांत, वर्गीकरण एवं नवीनतम प्रगति का व्यापक वैज्ञानिक अध्ययन प्रस्तुत करता है। इसमें पी-एन संधि, अवक्षय परत तथा फोटोवोल्टाइक प्रभाव की विस्तृत भौतिकी व्याख्या की गई है। सिलिकॉन आधारित प्रथम एवं द्वितीय पीढ़ी से लेकर पेरोव्स्काइट तथा टैंडम आधारित तृतीय एवं चौथी पीढ़ी तक की सौर कोशिकाओं का तुलनात्मक विश्लेषण प्रस्तुत किया गया है। हालिया शोध में एकल संधि पेरोव्स्काइट कोशिकाओं की प्रमाणित दक्षता 27.0% तथा पेरोव्स्काइट-सिलिकॉन टैंडम कोशिकाओं की दक्षता 34.85% तक पहुँच चुकी है। सौर ऊर्जा के सामाजिक, पर्यावरणीय एवं आर्थिक महत्व पर भी प्रकाश डाला गया है।

सूचक शब्द – सौर कोशिका, फोटोवोल्टाइक प्रभाव, पी-एन संधि, अवक्षय परत, पेरोव्स्काइट, टैंडम सौर कोशिका, नवीकरणीय ऊर्जा



Solar Cells and Their Latest Advances: A Scientific Study Towards Clean Energy

Priyanka Singh*

Department of Physics and Material Science, Madan Mohan Malaviya University of Technology, Gorakhpur,
Uttar Pradesh, India – 273010

Corresponding author Email*: priyankasonam@gmail.com

Received on: 07 February 2026; Final Revision: 19 February 2026; Accepted: 19 February 2026
Published Online First on: 18 March 2026

ABSTRACT

This research paper presents a comprehensive scientific study of the physics, working principles, classification, and latest advances in solar cells. It includes a detailed physics explanation of the p-n junction, depletion layer, and photovoltaic effect. A comparative analysis of which solar cells from first-generation silicon-based to fourth-generation quantum dot and tandem technologies is presented. Recent research has achieved certified efficiencies of 27.0% for single-junction perovskite cells and 34.85% for perovskite-silicon tandem cells. The social, environmental, and economic significance of solar energy is also discussed.

Keywords – Solar cell, Photovoltaic effect, p-n junction, Depletion layer, Perovskite, Tandem solar cell, Renewable energy

1. प्रस्तावना

वर्तमान युग में बढ़ती ऊर्जा आवश्यकताओं और पर्यावरणीय असंतुलन ने मानव समाज के समक्ष गंभीर चुनौतियाँ उत्पन्न कर दी हैं। औद्योगीकरण, शहरीकरण तथा जनसंख्या वृद्धि के कारण ऊर्जा की माँग में निरन्तर वृद्धि हो रही है। अन्तर्राष्ट्रीय ऊर्जा एजेंसी (International Energy Agency, IEA) के अनुमान के अनुसार विश्व की प्राथमिक ऊर्जा माँग 2040 तक लगभग 30 प्रतिशत बढ़ने की सम्भावना है [1]। परम्परागत ऊर्जा स्रोतों जैसे कोयला, पेट्रोलियम एवं प्राकृतिक गैस के अत्यधिक उपयोग से वायु प्रदूषण, ग्रीनहाउस प्रभाव तथा वैश्विक तापवृद्धि जैसी गम्भीर पर्यावरणीय समस्याएँ उत्पन्न हुई हैं। जीवाश्म ईंधनों के दहन से वातावरण में कार्बन डाइऑक्साइड (CO_2), मीथेन (CH_4) तथा नाइट्रस ऑक्साइड (N_2O) जैसी ग्रीनहाउस गैसों की सांद्रता में अभूतपूर्व वृद्धि हुई है, जो जलवायु परिवर्तन, ध्रुवीय हिमखण्डों के पिघलने तथा समुद्र स्तर में वृद्धि का प्रमुख कारण है [7]।

इन परिस्थितियों में नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों का विकास अत्यन्त आवश्यक हो गया है। नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों में सौर ऊर्जा, पवन ऊर्जा, जल विद्युत, भू-तापीय ऊर्जा तथा जैव ऊर्जा प्रमुख हैं। इनमें सौर ऊर्जा सर्वाधिक प्रचुर एवं सुलभ स्रोत है — पृथ्वी की सतह पर प्रतिदिन लगभग 1.74×10^{17} वॉट सौर विकिरण प्राप्त होता है, जो सम्पूर्ण विश्व की वर्तमान ऊर्जा खपत से लगभग 10,000 गुना अधिक है [1]। सौर ऊर्जा इस दिशा में एक स्वच्छ, सतत एवं पर्यावरण-अनुकूल ऊर्जा स्रोत के रूप में उभरकर सामने आई है।

सौर कोशिकाएँ (Solar Cells) अर्धचालक आधारित ऐसे इलेक्ट्रॉनिक उपकरण हैं जो सूर्य के प्रकाश को फोटोवोल्टाइक प्रभाव (Photovoltaic Effect) के माध्यम से प्रत्यक्ष रूप से विद्युत ऊर्जा में परिवर्तित करती हैं। इस प्रभाव की खोज सर्वप्रथम 1839 में फ्रांसीसी भौतिकविद् एडमण्ड बेक्वेरेल (Edmond Becquerel) ने की थी, जब उन्होंने प्रकाश के प्रभाव में विद्युत अपघट्य विलयन में विद्युत वाहक बल उत्पन्न होते देखा। तत्पश्चात् 1954 में बेल प्रयोगशाला (Bell Laboratories) के वैज्ञानिकों चैपिन, फुलर तथा पियर्सन (Chapin, Fuller and Pearson) ने प्रथम व्यावहारिक सिलिकॉन सौर कोशिका का निर्माण किया, जिसकी दक्षता लगभग 6 प्रतिशत थी [2]। तब से लेकर आज तक सौर कोशिका प्रौद्योगिकी में अभूतपूर्व प्रगति हुई है और आधुनिक एकल संधि (single junction) सिलिकॉन कोशिकाओं की दक्षता 27 प्रतिशत से अधिक तथा पेरॉव्स्काइट-सिलिकॉन टैंडम कोशिकाओं की दक्षता 34.85 प्रतिशत तक पहुँच चुकी है [4, 10]।

भारत जैसे उष्णकटिबन्धीय देश के लिए सौर ऊर्जा विशेष रूप से महत्वपूर्ण है, क्योंकि भारत को वर्ष में औसतन 300 से अधिक दिन प्रचुर सूर्य प्रकाश प्राप्त होता है तथा अधिकांश भू-भाग पर 4-7 $\text{kWh/m}^2/\text{दिन}$ सौर विकिरण उपलब्ध होता है [8]। भारत सरकार के राष्ट्रीय सौर मिशन (National Solar Mission) के अन्तर्गत 2030 तक 500 गीगावॉट नवीकरणीय ऊर्जा क्षमता का लक्ष्य निर्धारित किया गया है, जिसमें सौर ऊर्जा की प्रमुख भूमिका है [8]। इस सन्दर्भ में सौर कोशिकाओं की भौतिकी, कार्य सिद्धान्त, विभिन्न प्रकारों तथा नवीनतम वैज्ञानिक प्रगति का अध्ययन अत्यन्त प्रासंगिक एवं आवश्यक है।

प्रस्तुत शोध पत्र में सौर कोशिकाओं के मूलभूत भौतिकी सिद्धान्तों - पी-एन संधि (p-n junction), अवक्षय परत (depletion layer) तथा फोटोवोल्टाइक प्रभाव - की विस्तृत व्याख्या प्रस्तुत की गई है। इसके साथ ही विभिन्न प्रकार की सौर कोशिकाओं का तुलनात्मक विश्लेषण, पेरॉव्स्काइट एवं टैंडम कोशिकाओं में हालिया प्रगति, तथा सौर ऊर्जा के सामाजिक एवं पर्यावरणीय महत्व पर विस्तृत चर्चा की गई है। हिन्दी भाषा में इस विषय पर वैज्ञानिक लेखन का उद्देश्य विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी को समाज के व्यापक वर्ग तक सुलभ बनाना है।

2. सौर कोशिका की भौतिकी

सौर कोशिकाओं का कार्य अर्धचालक भौतिकी के मूलभूत सिद्धान्तों पर आधारित है। इसे समझने के लिए पी-एन संधि (p-n junction), अवक्षय परत (depletion layer) तथा फोटोवोल्टाइक प्रभाव (photovoltaic effect) की विस्तृत भौतिकी को जानना आवश्यक है।

2.1 पी-एन संधि (p-n Junction)

जब एक पी-प्रकार (p-type) अर्धचालक तथा एक एन-प्रकार (n-type) अर्धचालक को परस्पर संयोजित किया जाता है, तो उनके संगम पर एक पी-एन संधि (p-n junction) का निर्माण होता है (चित्र 1)। पी-प्रकार अर्धचालक में होल (holes) बहुसंख्यक आवेश वाहक होते हैं, जबकि एन-प्रकार अर्धचालक में इलेक्ट्रॉन (electrons) बहुसंख्यक आवेश वाहक होते हैं। संधि निर्माण के तुरन्त पश्चात् इलेक्ट्रॉन एन-क्षेत्र से पी-क्षेत्र की ओर तथा होल पी-क्षेत्र से एन-क्षेत्र की ओर विसरित (diffuse) होते हैं। इस विसरण प्रक्रिया के कारण संधि के निकट एक आवेश-मुक्त क्षेत्र बनता है, जिसे अवक्षय परत कहते हैं [2]।

2.2 अवक्षय परत (Depletion Layer)

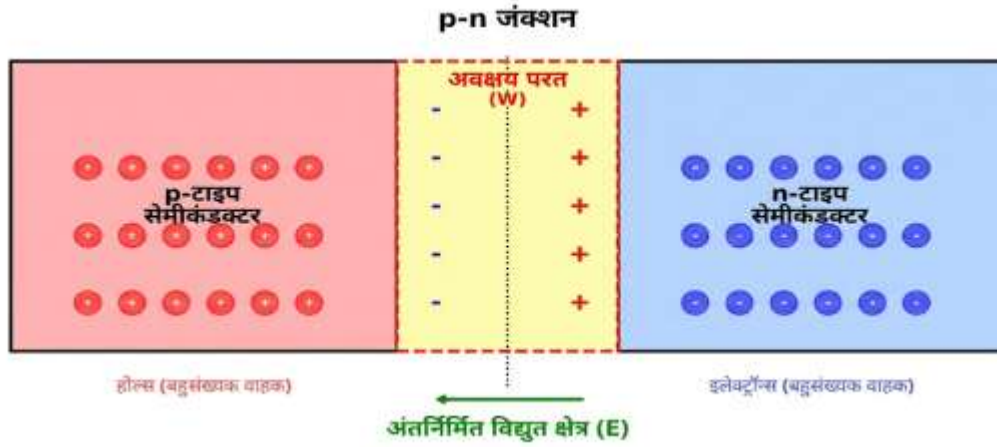
अवक्षय परत पी-एन संधि का सर्वाधिक महत्वपूर्ण क्षेत्र है। जब इलेक्ट्रॉन एवं होल संधि पर पुनर्संयोजित (recombine) होते हैं, तो वे स्थिर आयन छोड़ जाते हैं — एन-पक्ष पर धनात्मक दाता आयन तथा पी-पक्ष पर ऋणात्मक ग्राही आयन। ये स्थिर आवेश एक आन्तरिक विद्युत क्षेत्र (built-in electric field, E) उत्पन्न करते हैं, जो एन-क्षेत्र से पी-क्षेत्र की ओर निर्देशित होता है। यह विद्युत क्षेत्र आगे विसरण को रोकता है और एक साम्यावस्था स्थापित करता है। अवक्षय परत की चौड़ाई (W) बाह्य वोल्टेज, अपमिश्रण सांद्रता एवं अर्धचालक के परावैद्युतांक पर निर्भर करती है। विशिष्ट सिलिकॉन सौर कोशिकाओं में इसकी चौड़ाई लगभग $0.1\text{--}1\ \mu\text{m}$ होती है। इस क्षेत्र में उत्पन्न विभवान्तर को अन्तर्निर्मित विभव (built-in potential, V_{bi}) कहते हैं, जो सिलिकॉन पी-एन संधि के लिए सामान्यतः $0.6\text{--}0.7\ \text{V}$ होता है [2]।

2.3 फोटोवोल्टाइक प्रभाव (Photovoltaic Effect)

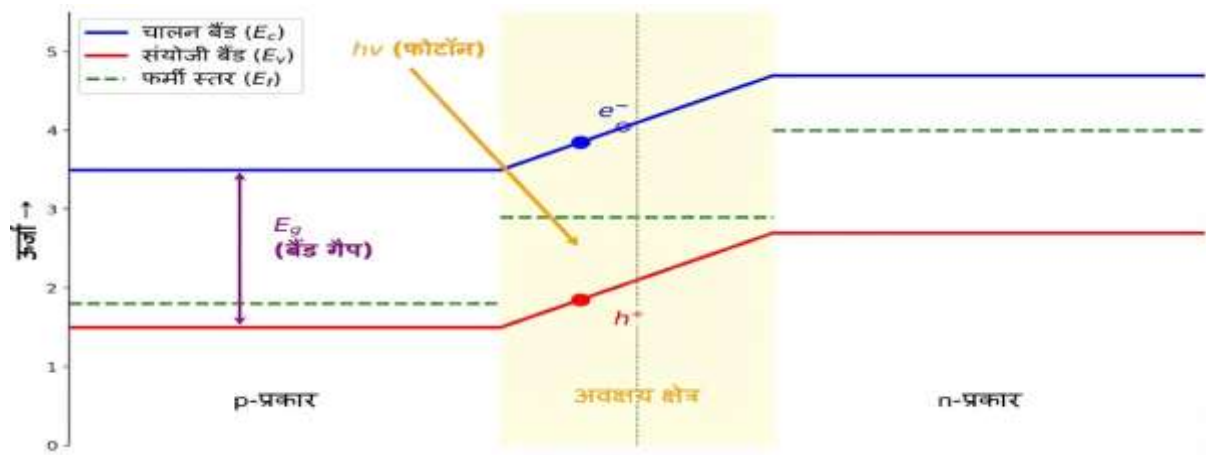
फोटोवोल्टाइक प्रभाव सौर कोशिकाओं के कार्य का मूल सिद्धान्त है (चित्र 2)। जब सूर्य का प्रकाश सौर कोशिका की सतह पर पड़ता है, तो जिन फोटॉनों की ऊर्जा अर्धचालक के बैंड गैप (E_g) से अधिक या बराबर होती है अर्थात् $h\nu \geq E_g$, वे संयोजकता बैंड (valence band) से इलेक्ट्रॉनों को चालन बैंड (conduction band) में उत्तेजित करते हैं। इस प्रक्रिया से इलेक्ट्रॉन-होल युग्म (electron-hole pair) उत्पन्न होते हैं। अवक्षय क्षेत्र का आन्तरिक विद्युत क्षेत्र इन उत्पन्न आवेश वाहकों को पृथक् करता है — इलेक्ट्रॉन एन-क्षेत्र की ओर तथा होल पी-क्षेत्र की ओर प्रवाहित होते हैं। यदि बाह्य परिपथ जोड़ा जाए तो ये पृथक् आवेश वाहक विद्युत धारा उत्पन्न करते हैं [2]।

2.4 सौर कोशिका की संरचना

एक प्रारूपिक सौर कोशिका में कई परतें होती हैं (चित्र 3): (i) परावर्तन-रोधी लेपन (Anti-Reflection Coating, ARC) जो प्रकाश के परावर्तन को न्यूनतम करता है; (ii) एन-प्रकार अर्धचालक (उत्सर्जक परत); (iii) पी-एन संधि एवं अवक्षय परत जहाँ आवेश पृथक्करण होता है; (iv) पी-प्रकार अर्धचालक (आधार परत); तथा (v) पश्च एवं अग्र धात्विक संपर्क (electrodes) जो विद्युत धारा के संग्रहण एवं बाह्य परिपथ से संयोजन हेतु आवश्यक हैं। सिलिकॉन का बैंड गैप $1.12\ \text{eV}$ है, जो सौर वर्णक्रम के एक विस्तृत भाग को अवशोषित करने में सक्षम है [2]।



चित्र 1: पी-एन संधि की संरचना: पी-प्रकार (लाल) एवं एन-प्रकार (नीला) अर्धचालक क्षेत्र, अवक्षय परत (पीला छायांकित), होल (+) एवं इलेक्ट्रॉन (-) वाहक, तथा आन्तरिक विद्युत क्षेत्र की दिशा दर्शायी गई है। (स्व-रचित आरेख)



चित्र 2: पी-एन संधि का ऊर्जा बैंड आरेख: चालन बैंड (E_c , नीला), संयोजकता बैंड (E_v , लाल), फर्मी स्तर (E_f , हरा), बैंड गैप (E_g), अवक्षय क्षेत्र (पीला छायांकित), तथा फोटॉन ($h\nu$) अवशोषण से इलेक्ट्रॉन-होल युग्म उत्पादन की प्रक्रिया दर्शायी गई है। (स्व-रचित आरेख)



चित्र 3: सौर कोशिका की परतीय संरचना: परावर्तन-रोधी लेपन (ARC), एन-प्रकार अर्धचालक, पी-एन संधि (अवक्षय परत), पी-प्रकार अर्धचालक, पश्च संपर्क, अग्र संपर्क ग्रिड, बाह्य भार (R), तथा विद्युत धारा (I) का प्रवाह पथ दर्शाया गया है। (स्व-रचित आरेख)

3. सौर कोशिकाओं के प्रकार



चित्र 4: एकल क्रिस्टलीय (monocrystalline) एवं बहुक्रिस्टलीय (polycrystalline) सौर पैनलों की संरचना एवं उनके व्यावहारिक अनुप्रयोग। एकल क्रिस्टलीय पैनल 22-27% तथा बहुक्रिस्टलीय पैनल 18-23% तक दक्षता प्रदान करते हैं [3]।



चित्र 5: पतली परत (thin-film) तथा लचीली सौर कोशिकाओं का आधुनिक तकनीकी स्वरूप। इनमें CdTe, CIGS तथा अमोर्फस सिलिकॉन (a-Si) की 1-2 μm मोटी परतें प्रयुक्त होती हैं [3]।

वर्तमान में सर्वाधिक प्रचलित सौर कोशिकाएँ सिलिकॉन आधारित हैं, जिनमें एकल क्रिस्टलीय तथा बहुक्रिस्टलीय कोशिकाएँ प्रमुख हैं (चित्र 4)। एकल क्रिस्टलीय कोशिकाएँ उच्च दक्षता प्रदान करती हैं, जबकि बहुक्रिस्टलीय कोशिकाएँ कम लागत के कारण अधिक लोकप्रिय हैं। इसके अतिरिक्त पतली

परत सौर कोशिकाएँ जैसे CdTe, CIGS तथा अमोर्फस सिलिकॉन आधारित कोशिकाएँ भी विकसित की गई हैं (चित्र 5) [3]। सारणी 1 में विभिन्न प्रकार की सौर कोशिकाओं की दक्षता, लागत, सामग्री एवं अनुप्रयोगों का तुलनात्मक विवरण प्रस्तुत किया गया है।

सारणी 1: विभिन्न प्रकार की सौर कोशिकाओं का तुलनात्मक विश्लेषण

सौर कोशिका प्रकार	प्रमुख सामग्री	दक्षता (%)	सापेक्ष लागत	प्रमुख अनुप्रयोग
एकल क्रिस्टलीय Si	c-Si (Czochralski)	22-27%	उच्च	आवासीय छत, अन्तरिक्ष
बहुक्रिस्टलीय Si	mc-Si	18-23%	मध्यम	बड़े सौर संयन्त्र
CdTe पतली परत	CdTe/CdS	18-22%	निम्न-मध्यम	उपयोगिता-स्तरीय संयन्त्र
CIGS पतली परत	Cu(In,Ga)Se ₂	20-23%	मध्यम	लचीले पैनल, BIPV
अमोर्फस सिलिकॉन	a-Si:H	6-12%	निम्न	कैलकुलेटर, भवन एकीकरण
पेरोव्स्काइट	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	26-27%	अति निम्न (सम्भावित)	अगली पीढ़ी, टैंडम
पेरोव्स्काइट-Si टैंडम	पेरोव्स्काइट/c-Si	33-34.9%	शोध चरण	अति उच्च दक्षता प्रणाली
ऑर्गेनिक (OPV)	पॉलिमर/फुलरीन	15-20%	निम्न	पहनने योग्य, IoT उपकरण

नोट: दक्षता मान NREL (2025) प्रमाणित प्रयोगशाला परिणामों पर आधारित हैं। व्यावसायिक मॉड्यूल दक्षता सामान्यतः 3-5% कम होती है।

4. सौर कोशिकाओं का ऐतिहासिक विकास एवं पीढ़ीकरण

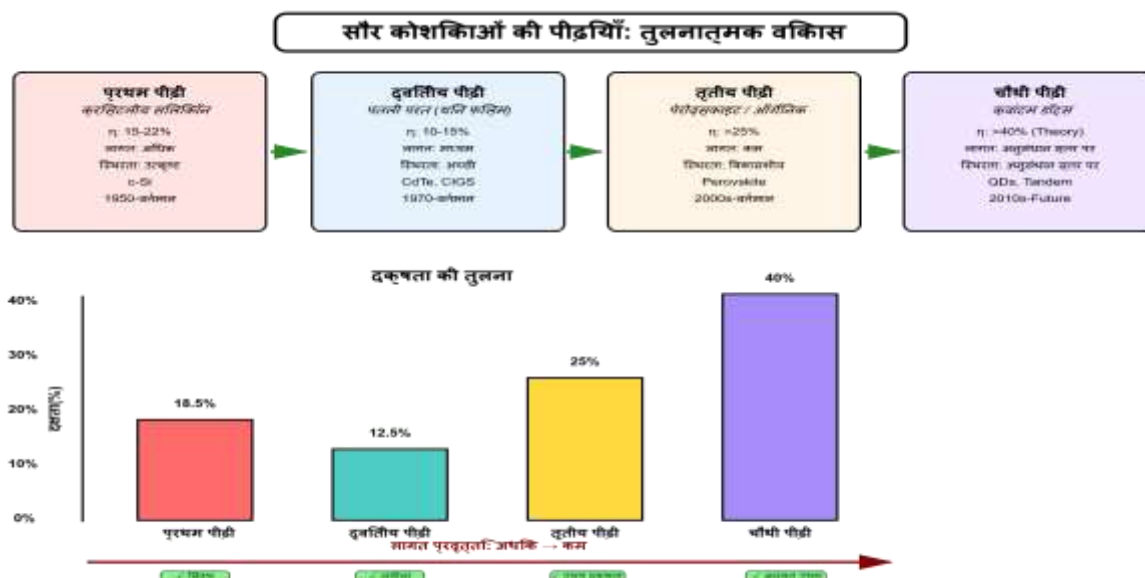
सौर कोशिकाओं का विकास वैज्ञानिक अनुसन्धान, सामग्री विज्ञान एवं अर्धचालक प्रौद्योगिकी की प्रगति के साथ जुड़ा हुआ है। तकनीकी उन्नति के

4.1 पीढ़ियों की तुलनात्मक सारणी

आधार पर सौर कोशिकाओं को चार प्रमुख पीढ़ियों में वर्गीकृत किया जाता है [4]

विशेषता	प्रथम पीढ़ी	द्वितीय पीढ़ी	तृतीय पीढ़ी	चौथी पीढ़ी
सामग्री	क्रिस्टलीय सिलिकॉन	CdTe, CIGS, a-Si	पेरोव्स्काइट, ऑर्गेनिक	क्वांटम डॉट, टैंडम
दक्षता	15-22%	10-15%	>25%	>40% (सैद्धान्तिक)
लागत	उच्च	मध्यम	निम्न	शोध चरण
स्थिरता	उत्कृष्ट (>25 वर्ष)	अच्छी (20-25 वर्ष)	विकासाधीन	प्रयोगशाला चरण
मुख्य लाभ	सिद्ध तकनीक, विश्वसनीय	लचीली, हल्की	उच्च दक्षता, सरल निर्माण	अति उच्च दक्षता सम्भावित
मुख्य सीमाएँ	उच्च लागत, भारी	कम दक्षता	स्थिरता समस्या	जटिल निर्माण

सारणी 2: सौर कोशिकाओं की पीढ़ीवार तुलना

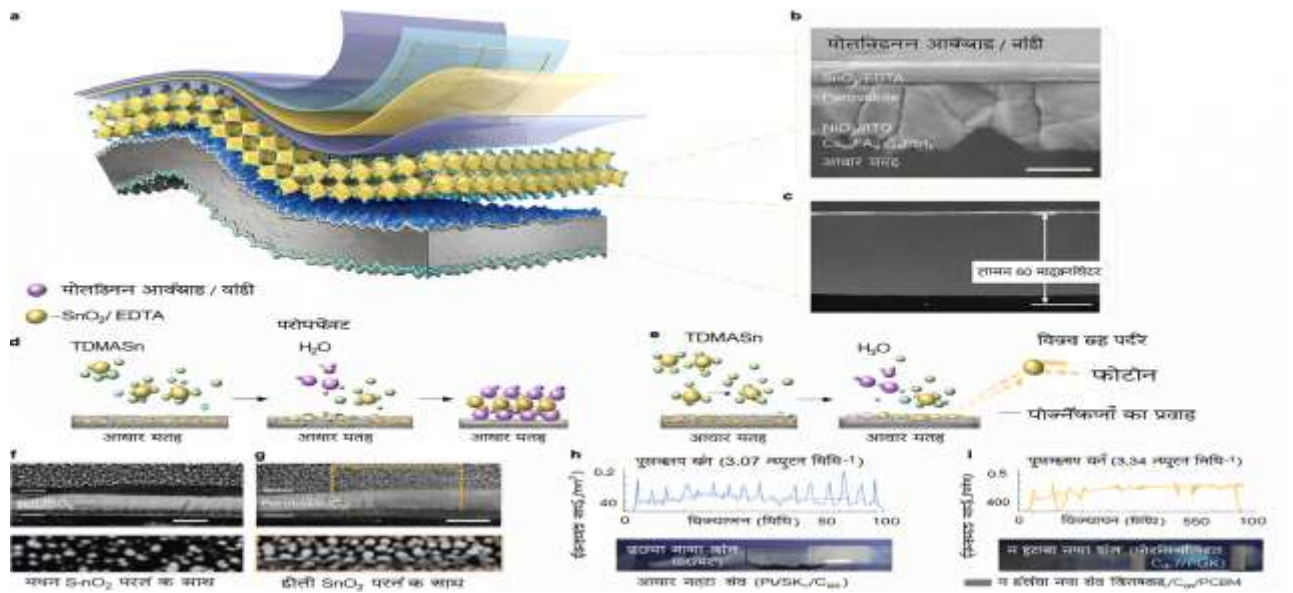


चित्र 6: सौर कोशिकाओं की चार पीढ़ियों का तुलनात्मक विश्लेषण: प्रथम पीढ़ी (c-Si, 15-22%) से चौथी पीढ़ी (क्वांटम डॉट/टैंडम, सैद्धान्तिक >40%) तक का विकास क्रम [4]

5. सौर कोशिकाओं में हालिया प्रगति



चित्र 7: प्रयोगशाला में निर्मित पेरोव्स्काइट सौर कोशिका की सूक्ष्म संरचना। पेरोव्स्काइट कोशिकाओं में ABX_3 क्रिस्टल संरचना (जहाँ $A = CH_3NH_3^+/Cs^+$, $B = Pb^{2+}/Sn^{2+}$, $X = I^-/Br^-/Cl^-$) का उपयोग प्रकाश अवशोषक परत के रूप में किया जाता है। इनका बैंड गैप (1.2-2.3 eV) समायोज्य होता है [9]



चित्र 8: पेरोव्स्काइट-सिलिकॉन टैंडम एवं पारदर्शी सौर कोशिकाओं का उन्नत मॉडल। टैंडम संरचना में ऊपरी पेरोव्स्काइट परत (~1.7 eV) उच्च ऊर्जा फोटॉन अवशोषित करती है, जबकि निचली सिलिकॉन परत (~1.1 eV) अवशेष प्रकाश का उपयोग करती है [5, 10]

हाल के वर्षों में सौर प्रौद्योगिकी में उल्लेखनीय प्रगति हुई है। पेरोव्स्काइट आधारित सौर कोशिकाएँ अपनी उच्च दक्षता और कम लागत के कारण विशेष रूप से शोध का केन्द्र बनी हुई हैं। 2025 तक एकल संधि पेरोव्स्काइट सौर कोशिकाओं की प्रमाणित दक्षता 27.0% तक पहुँच चुकी है, जो चीन के विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय (USTC) द्वारा प्राप्त की गई तथा NREL द्वारा प्रमाणित है [9]।

टैंडम सौर कोशिकाओं के क्षेत्र में और भी प्रभावशाली प्रगति हुई है। चीनी कम्पनी LONGi ने अप्रैल 2025 में पेरोव्स्काइट-सिलिकॉन टैंडम सौर कोशिका के लिए 34.85% दक्षता का नया विश्व कीर्तिमान स्थापित किया, जो NREL द्वारा प्रमाणित है [10]। यह उपलब्धि एकल संधि सिलिकॉन कोशिकाओं की शॉकले-क्वाइसर सैद्धान्तिक सीमा (~33.7%) को पार करती है। लचीली पेरोव्स्काइट-सिलिकॉन टैंडम कोशिकाओं में भी 33.6% दक्षता प्राप्त की गई है [11]।

व्यावसायिकरण की दिशा में भी महत्वपूर्ण प्रगति हुई है। यूके स्थित Oxford PV ने 24.5% दक्षता वाले टैंडम पैनलों का वाणिज्यिक उत्पादन प्रारम्भ किया है, जबकि कोरियाई कम्पनी Qcells ने बड़े पैमाने पर निर्माण योग्य टैंडम कोशिका में 28.6% दक्षता हासिल की है [12]। नैनोप्रौद्योगिकी, मशीन लर्निंग सहायित सामग्री अन्वेषण, एवं हरित विलायकों के उपयोग से भी सौर कोशिकाओं की कार्यक्षमता तथा स्थायित्व में उल्लेखनीय सुधार हो रहा है। [6, 13]

6. सामाजिक एवं पर्यावरणीय महत्व

सौर ऊर्जा का सामाजिक एवं पर्यावरणीय महत्व अत्यन्त व्यापक है। इसके उपयोग से कार्बन डाइऑक्साइड उत्सर्जन में कमी आती है, जिससे जलवायु परिवर्तन की समस्या को नियन्त्रित किया जा सकता है। ग्रामीण एवं दूरस्थ क्षेत्रों में सौर ऊर्जा द्वारा बिजली की उपलब्धता सुनिश्चित की जा सकती है, जिससे शिक्षा, स्वास्थ्य एवं संचार सुविधाओं में सुधार होता है [7]। इसके अतिरिक्त सौर उद्योग रोजगार सृजन एवं आर्थिक विकास में भी सहायक सिद्ध हो रहा है।

7. भविष्य की सम्भावनाएँ

भविष्य में सौर कोशिकाओं की दक्षता, स्थिरता एवं लागत में और सुधार की सम्भावनाएँ हैं। सामग्री विज्ञान, कृत्रिम बुद्धिमत्ता तथा ऊर्जा भण्डारण तकनीकों के समन्वय से सौर प्रणालियाँ अधिक स्मार्ट एवं विश्वसनीय बनेंगी। आने वाले वर्षों में सौर ऊर्जा स्मार्ट ग्रिड एवं इलेक्ट्रिक वाहनों के साथ एकीकृत होकर एक समग्र ऊर्जा समाधान के रूप में विकसित होगी।

8. निष्कर्ष

सौर कोशिकाएँ स्वच्छ, सतत एवं पर्यावरण-अनुकूल ऊर्जा उत्पादन का एक सशक्त माध्यम हैं। हालिया वैज्ञानिक प्रगति ने इस क्षेत्र को अधिक प्रभावी एवं व्यावहारिक बना दिया है। निरन्तर अनुसन्धान एवं नवाचार से सौर ऊर्जा भविष्य की प्रमुख ऊर्जा स्रोत बन सकती है। हिन्दी में इस विषय पर वैज्ञानिक लेखन विज्ञान को समाज के व्यापक वर्ग तक पहुँचाने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाएगा।

संदर्भ ग्रंथ सूची (Bibliography/References)

- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefer, G., Hinken, D., Rauer, M., Hohl-Ebinger, J., & Hao, X. (2024). Solar cell efficiency tables (Version 64). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 32(7), 425–441. <https://doi.org/10.1002/pip.3831>
- Tao, M. (2014). Physics of Solar Cells. In: Terawatt Solar Photovoltaics. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5643-7_3
- Verma, P. K. (2020). *Solar energy technology* (1st ed.). Pune, India: Technical Publications ([Photovoltaic Solar Energy Conversion | ScienceDirect](https://www.scribd.com/document/381111111/Solar-Energy-Technology)).
- National Renewable Energy Laboratory. (2025). *Best research-cell efficiencies chart*. U.S. Department of Energy. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Khanna, M. K., Malik, S., Kumar, H., & Suruchi. (2023). *Indian solar panel initiatives in reducing carbon dioxide emissions*. Energy and Power Engineering, 15, 191–203. <https://doi.org/10.4236/epe.2023.154009>
- Parmar, K., & Bhande, R. (2022). Future of nanotechnology in solar energy and hydrogen energy. *Journal of Energy Research and Reviews*, 10(2), 61–70. DOI: <https://doi.org/10.9734/jenrr/2022/v10i230254>
- Indian Renewable Energy Development Agency Limited. (2023). *Annual report 2022–23*. IREDA. ([AnnualReport23withcovering.pdf](https://www.ireda.co.in/AnnualReport23withcovering.pdf))
- Ministry of New and Renewable Energy. (2022). *National solar mission report*. Government of India. (https://mnre.gov.in/file-manager/UserFiles/mission_document_JNNSM.pdf)
- Green, M. A. et al., (2024). Solar cell efficiency tables (Version 64). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 32(7), 425–441. <https://doi.org/10.1002/pip.3831>
- LONGi Solar. (2025). Perovskite–silicon tandem solar cell world record efficiency of 34.85% (NREL certified). LONGi Green Energy Technology Co., <https://www.longi.com/en/news/silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/>

11. Bush, K. A. et al., M. D. (2025). Flexible perovskite/silicon tandem solar cells with high efficiency. *Nature Energy*, 2, 17009. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.9>
12. Hanwha Qcells. (2024). *Large-area perovskite-silicon tandem solar cell with 28.6% efficiency record*, Qcells Research. Oxford PV. (2024). *Commercial tandem solar panel shipments*. Oxford PV Ltd, [Hanwha Qcells sets record in tandem solar cell efficiency](#)
13. Zhang, K., et al. (2025). Key advancements and emerging trends of perovskite solar cells in 2024–2025. *Nano-Micro Letters*, 18, Article 209, <https://doi.org/10.1007/s40820-025-02022-6>