# STUDIES ON GRAPHITIC CARBON NITRIDE NANOSTRUCTURES FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

**SAURABH PAREEK**


DEPARTMENT OF ENERGY SCIENCE AND ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
April 2023

# STUDIES ON GRAPHITIC CARBON NITRIDE NANOSTRUCTURES FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

by

**SAURABH PAREEK**

Department of Energy Science and Engineering

Submitted

In fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the


INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2023

*Dedicated to*

*My Parents….*

# CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled, "**Studies on graphitic carbon nitride nanostructures for photovoltaic applications**", submitted by **Mr. Saurabh Pareek** to the Department of Energy Science and Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of the **Doctor of Philosophy** is a record bonafide research work carried out by him under my supervision and guidance. The results contained in this thesis have not been submitted in part or full, to any other University or Institute for the award of any degree/diploma.

Date:

Place: New Delhi.

**Dr. Supravat Karak**

Department of Energy Science and Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

Hauz Khas, New Delhi-110016, India

# Acknowledgments

First and foremost, I want to offer my praise and gratitude to **God Almighty**, for the blessings, peace, strength, and health, He bestowed upon me to finish my research work.

The Doctor of Philosophy is not just a degree but a journey. Today when I am about to reach the destination, I realized that pursuing a Ph.D. requires a lot of hard work, and patience and is somewhat a lonely path. This thesis has become a reality with the kind support and help of many individuals. I would like to extend my sincere gratitude to all of them.

In this regard, firstly I am thankful to my dissertation advisor, **Dr. Supravat Karak** (Associate Professor, DESE), under his guidance I learned the basics of my research work. I am highly indebted for his support and guidance in carrying out my research work and formulating the work into a publishable story. I admire and appreciate his valuable suggestions and insights throughout my Ph.D. work. His prompt inspiration, timely suggestions with kindness, enthusiasm, and dynamism have enabled me to complete this thesis.

I would also like to thank **Prof. K A Subramanyam**, Head of the Department of Energy Science and Engineering (DESE) for his support during my Ph.D. I express my gratitude to the members of my Ph.D. research committee, **Prof. Vamsi K Komarala** (DESE), **Dr. Sandeep Pathak** (DESE), **Dr. Vipin Kumar** (DESE), and **Dr. Samaresh Das** (CARE) for their constant help and advice. I also thank all the faculty members of DESE and the administrative staff for their valuable support.

My sincere regards to Nanoscale Research Facility (NRF) and Central Research Facility's (CRF) faculty members and TAs for their support during characterization. I am also thankful to the **Ministry of Education** formerly known as the **Ministry of Human Resource Development** for their financial support.

I thank my fellow lab mates of the Organic and Hybrid Electronic Device Laboratory (OHEDL), along with all members of the PV group for providing their support. The journey was not that much beautiful without my friends. I owe a deep sense of gratitude to my friends who supported me in hard times and celebrated each accomplishment: **Dr. Mandakini Sharma**, **Dr. Sobia Waheed**. Their cooperation would be an unforgettable experience.

An endeavour on the long journey of a Ph.D. requires sacrifice not only on the part of the student but also from his close family members. I will never be able to repay the efforts laid down by my parents to prepare me for this study. My parents deserve special attention for their everlasting support, love, prayers, care, and sacrifice. My loving parents **Mrs. Madhu Pareek** and **Mr. Rajendra Kumar Pareek** are in the first place who rooted the strength in my character, showing me the joy of intellectual pursuit since childhood. It is their love, sacrifice, and support through the years that landed me at the Indian Institute of Technology Delhi (IIT Delhi) and provided the strength for the completion of my Ph.D. thesis. I can never thank you enough **Mummy** and **Papa**.

The words and ideas that follow represent only a small share of everything that happened in the completion of this thesis. It is the success that you read in these pages; however, the undocumented failures and minor successes also make up this thesis. It is due to the group of people described above, that all of this was possible. During My time at IIT Delhi, I made scientific, and personal discoveries, published articles, got the opportunity to travel abroad, and developed lifelong friendships.

Before, I finish I offer my regards and blessings to all those who supported me and offered me their gracious help in any aspect of the completion of this research work, with my sincere apology, if I was not able to mention all of them individually.

**Saurabh Pareek**

# Abstract

Graphitic carbon nitride is a 2-dimensional material analogous to graphite. It possesses a layered structure consisting of triazine or heptazine motifs arranged in a hexagonal fashion. Owing to its layered structure, bonded via weak Van der Waals forces, it can delaminate the bulk material into graphene-like novel nanostructures (nanosheets and quantum dots). It possesses promising material properties such as n-type semiconducting nature, strong absorption in UV-visible region, high chemical stability, and tunable optoelectronic properties making it a potential candidate for optoelectronic device applications. Herein, we have demonstrated the facile synthesis strategy to synthesize g-$C_3N_4$ nanosheets (NS) and quantum dots (QDs) by green route using water as the exfoliating agent and chemical acidification of bulk material followed by hydrothermal treatment, respectively. The structural and optical properties were investigated in detail to understand the structure-property relationship of prepared low-dimensional materials. It was observed that the chemical structure was well preserved even after exfoliation and acidification of bulk material into nanosheets and quantum dots. The NS and QDs possess an ultra-thin nature as evidenced by AFM and HRTEM images having thicknesses below 5 nm and 1.7 nm, respectively. These nanostructures possess tunability in optical properties as observed from blue-shifted absorption and emission spectra. Moreover, a reduction in urbach energy after exfoliation suggests a smaller probability of photogenerated carrier recombination. These appealing properties pave the path for the utilization of these nanostructures for photovoltaic applications either as an additive for the active/interface layer or as a charge-selective interface layer.

The multi-functionality of the prepared quantum dots was explored as an additive for poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl):[6,6]-phenyl-C71-butyric acid methyl ester (P3HT:$PC_{71}BM$) blend active layer. The QDs were prepared in an organic solvent (o-dichlorobenzene) to maintain compatibility with the device fabrication process. The photovoltaic effect formation

and various effects of g-$C_3N_4$ QDs on energy transfer, carrier transport, and nanoscale morphology were investigated in detail by incorporation as a third component into a well-established material combination of P3HT:$PC_{71}BM$ blend films. The emission spectra of g-$C_3N_4$ QDs and absorption spectra of P3HT were found to have overlapping features that enabled the QDs to transfer ultraviolet region photons to P3HT. The g-$C_3N_4$ QDs were found to assist förster resonance energy transfer (FRET) between the QDs and host polymer, improving the overall energy harvesting capability of the devices. Moreover, g-$C_3N_4$ QDs were favorable in maintaining nanoscale phase segregation of the active layer with improved crystallinity which is crucial for efficient exciton dissociation and faster charge extraction. The incorporation of g-$C_3N_4$ QDs, improved the device efficiency by almost 40% for optimal concentration of QDs i.e., 2 Vol% compared to reference one. The improved device efficiency is thus attributed to the combined consequences of improved morphology and the FRET effect.

The g-$C_3N_4$ NS and QDs were utilized as a secondary dopant to modulate the structural and electronic properties of commonly used hole transport layer viz. PEDOT:PSS. The addition of NS and QDs weakened the columbic interaction between the PEDOT and PSS leading to the formation of an expanded coil-like structure. This resulted in the reorientation of the PEDOT chain forming the interconnected charge transport pathways thereby, improving the conductivity of modified films. When employed as a hole transport layer in polymer solar cells they yielded the power conversion efficiency of 7.65% and 6.44% at an optimal concentration of 50 Vol% and 60 Vol% for NS and QDs, respectively, compared to 5.45% for reference one. This improvement in photovoltaic performance can be attributed to the increased short circuit current density ($J_{SC}$), charge carrier mobility, fill factor (*FF*), and reduced series resistance ($R_s$). However, the *FF* was higher for NS-based devices as they provide better continuous charge hopping pathways compared to QDs. Moreover, the modification in the molecular structure of PEDOT:PSS via NS and QDs resulted in improved device stability compared to reference one,

retaining almost 40% of initial power conversion efficiency even after 200 min of continuous illumination. These results demonstrate the systematic strategy for improving the conductivity and mobility of HTL resulting in efficient extraction of charge carriers, enhanced device performance, and stability.

The g-$C_3N_4$ NS was utilized as a charge-selective interface layer in polymer solar cells both for extraction of electrons and holes. The work function of ITO decreased from 4.94 eV to 4.43 eV after coating with NS. However, with UV-ozone (UV-$O_3$) treatment gradual increase in work function was observed and for the optimal treatment duration (10 min), it reaches 5.25 eV. This suggests that in its pristine form, i.e., untreated ITO/g-$C_3N_4$ NS, it can extract electrons and therefore can be utilized as the cathode interface layer for inverted solar cells while after UV-$O_3$ treatment it facilitates the extraction of holes and thereby can be used as an anode interface layer in conventional device architecture. This has been demonstrated with the active layer combination of PTB7-Th:$PC_{71}BM$. Similar short circuit current densities (15.65 mA $cm^{-2}$) and power conversion efficiencies (5.60% and 6.05%) were observed for both inverted and conventional devices having g-$C_3N_4$ NS as the charge selective interface layer. The UV-$O_3$ treatment seems to modify the g-$C_3N_4$ NS thin film by inducing surface dipoles due to the incorporation of oxygen atoms which is primarily responsible for their switching behavior of work function as observed. This study demonstrates the dual functionality of g-$C_3N_4$ NS as a charge-selective interface layer (CIL/AIL) for solution-processable polymer solar cells.

The g-$C_3N_4$ possesses unique optoelectronic properties, however, its thin-film characteristics were not well explored, therefore, limiting its utilization for semiconductor device applications. Herein, we fabricated the thin film of 10 nm via thermal evaporation and studied the effect of UV-$O_3$ treatment on structural, optical, electrical, and dielectric properties. Systematic improvements in film characteristics were observed until 10 min treatment

duration. However, a further increase in treatment duration resulted in a detrimental effect on the thin-film properties. It was observed that the structure was well retained for the thin film after thermal evaporation and UV-$O_3$ treatment, as that of bulk g-$C_3N_4$. Moreover, the thermally evaporated film exhibited a smooth surface with r.m.s roughness well below 1 nm and the smoothness of the film further increased after treatment. The emission properties and urbach energy analysis suggested reduced charge carrier recombination leading to better photo-induced charge separation in thin film after UV-$O_3$ treatment. The treated thin film exhibited a smaller leakage current resulting in a higher dielectric constant and smaller loss.

All the above results suggest that g-$C_3N_4$ nanostructures and thin film possess appealing structural, optical, and electrical properties which can significantly improve the performance of polymer solar cells. However, its several unique features pave the path towards utilization in other semiconductor devices too, like perovskite solar cells, light emitting diodes, photodetectors, wearable technology devices, energy storage devices etc.

# सारांश

ग्राफिटिक कार्बन नाइट्राइड ग्रेफाइट के अनुरूप एक 2-आयामी सामग्री है। इसमें एक स्तरित संरचना होती है जिसमें एक हेक्सागोनल फैशन में व्यवस्थित ट्राइज़िन या हेप्टाज़िन रूपांकनों से मिलकर बनता है। कमजोर वेंडर वाल्स बलों के माध्यम से बंधे इसकी स्तरित संरचना के कारण, यह थोक सामग्री को ग्राफीन जैसे नए नैनोस्ट्रक्चर (नैनोशीट्स और क्वांटम डॉट्स) में बदल सकता है। इसमें एन-टाइप सेमीकंडक्टिंग प्रकृति, यूवी-दृश्य क्षेत्र में मजबूत अवशोषण, उच्च रासायनिक स्थिरता और ट्यून करने योग्य ऑप्टोइलेक्ट्रॉनिक गुण जैसे आशाजनक भौतिक गुण हैं, जो इसे ऑप्टोइलेक्ट्रॉनिक डिवाइस अनुप्रयोगों के लिए एक संभावित उम्मीदवार बनाते हैं। इसमें हमने g-$C_3N_4$ नैनोशीट्स (NS) और क्वांटम डॉट्स (QDs) को हरित मार्ग से संश्लेषित करने के लिए सरल संश्लेषण रणनीति का प्रदर्शन किया है, जिसमें क्रमशः पानी को एक्सफोलिएटिंग एजेंट के रूप में उपयोग किया जाता है और हाइड्रोथर्मल उपचार के बाद थोक सामग्री का रासायनिक अम्लीकरण किया जाता है। तैयार निम्न-आयामी सामग्रियों की संरचना-संपत्ति संबंध को समझने के लिए संरचनात्मक और ऑप्टिकल गुणों की विस्तार से जांच की गई। यह देखा गया कि नैनोशीट्स और क्वांटम डॉट्स में थोक सामग्री के एक्सफोलिएशन और अम्लीकरण के बाद भी रासायनिक संरचना अच्छी तरह से संरक्षित थी। NS और QDs में एक अल्ट्रा-पतली प्रकृति होती है, जैसा कि AFM और HRTEM छवियों द्वारा क्रमशः 5 nm और 1.7 nm से कम मोटाई होती है। इन नैनोस्ट्रक्चर में ऑप्टिकल गुणों में ट्यूनेबिलिटी होती है जैसा कि ब्लू शिफ्टेड अवशोषण और उत्सर्जन स्पेक्ट्रा से देखा जाता है। इसके अलावा, एक्सफोलिएशन के बाद उर्बाक ऊर्जा में कमी फोटोजेनरेटेड वाहक पुनर्संयोजन की एक छोटी संभावना का सुझाव देती है। ये आकर्षक गुण फोटोवोल्टिक अनुप्रयोगों के लिए इन नैनोस्ट्रक्चर के उपयोग के लिए मार्ग प्रशस्त करते हैं या तो सक्रिय/इंटरफ़ेस परत के लिए एक योजक के रूप में या चार्ज चयनात्मक इंटरफ़ेस परत के रूप में।

तैयार क्वांटम डॉट्स की बहु-कार्यक्षमता को पॉली (3-हेक्सिलथियोफीन -2,5-डाइल):[6,6]-फिनाइल-सी-71-ब्यूटिरिक एसिड मिथाइल एस्टर (P3HT:$PC_{71}BM$) मिश्रण सक्रिय परत के लिए एक

योजक के रूप में खोजा गया था । डिवाइस निर्माण प्रक्रिया के साथ संगतता बनाए रखने के लिए QDs को कार्बनिक विलायक (ओ-डाइक्लोरोबेंजीन) में तैयार किया गया था। फोटोवोल्टिक प्रभाव गठन और ऊर्जा हस्तांतरण, वाहक परिवहन और नैनोस्केल आकृति विज्ञान पर g-$C_3N_4$ QDs के विभिन्न प्रभावों की P3HT:$PC_{71}BM$ मिश्रण फिल्मों के एक अच्छी तरह से स्थापित सामग्री संयोजन में तीसरे घटक के रूप में शामिल करके विस्तार से जांच की गई थी। g-$C_3N_4$ QDs के उत्सर्जन स्पेक्ट्रा और P3HT के अवशोषण स्पेक्ट्रा में अतिव्यापी विशेषताएं पाई गईं जो QDs को पराबैंगनी क्षेत्र फोटॉन को P3HT में स्थानांतरित करने में सक्षम बनाती हैं। g-$C_3N_4$ QDs को QDs और होस्ट पॉलीमर के बीच फोरस्टर अनुनाद ऊर्जा हस्तांतरण (FRET) की सहायता करने के लिए पाया गया, जिससे उपकरणों की समग्र ऊर्जा संचयन क्षमता में सुधार हुआ। इसके अलावा, g-$C_3N_4$ QDs बेहतर स्फटिकता के साथ सक्रिय परत के नैनोस्केल चरण अलगाव को बनाए रखने में अनुकूल थे जो कुशल एक्सीटोनिक पृथक्करण और तेजी से चार्ज निष्कर्षण के लिए महत्वपूर्ण है। g-$C_3N_4$ QDs के समावेश ने QDs की इष्टतम सांद्रता के लिए डिवाइस दक्षता में लगभग 40% का सुधार किया, यानी संदर्भ की तुलना में 2 Vol%। इस प्रकार बेहतर उपकरण दक्षता को बेहतर आकृति विज्ञान और FRET प्रभाव के संयुक्त परिणामों के लिए जिम्मेदार ठहराया जाता है।

g-$C_3N_4$ NS और QDs का उपयोग आमतौर पर उपयोग किए जाने वाले होल परिवहन परत viz. PEDOT:PSS के संरचनात्मक और इलेक्ट्रॉनिक गुणों को संशोधित करने के लिए द्वितीयक डोपेंट के रूप में किया गया था। NS और QDs के प्रयोग से PEDOT और PSS के बीच कोलम्बिक इंटरेक्शन कमजोर हो गया, जिससे एक विस्तारित कॉइल जैसी संरचना का निर्माण हुआ। इसके परिणामस्वरूप PEDOT श्रृंखला का पुनर्विन्यास हुआ, जिससे परस्पर चार्ज परिवहन मार्गों का निर्माण हुआ, जिससे संशोधित फिल्मों की चालकता में सुधार हुआ। जब पॉलीमर सोलर सेल में होल परिवहन परत के रूप में नियोजित किये जाने पर उन्होंने NS और QDs के लिए क्रमशः 50 Vol% और 60 Vol% की इष्टतम सांद्रता पर 7.65% और 6.44% की बिजली रूपांतरण दक्षता प्राप्त की, जबकि संदर्भ के लिए यह 5.45%

थी। फोटोवोल्टिक प्रदर्शन में इस सुधार को शॉर्ट सर्किट करंट घनत्व ($J_{sc}$), चार्ज वाहक गतिशीलता, फिल फैक्टर (*FF*), और कम श्रृंखला प्रतिरोध ($R_s$) के लिए जिम्मेदार ठहराया जा सकता है। हालांकि, NS-आधारित उपकरणों के लिए *FF* अधिक था क्योंकि वे QDs की तुलना में बेहतर निरंतर चार्ज होपिंग मार्ग प्रदान करते हैं। इसके अलावा, NS और QDs के माध्यम से PEDOT:PSS की आणविक संरचना में संशोधन के परिणामस्वरूप संदर्भ की तुलना में डिवाइस स्थिरता में सुधार हुआ, 200 मिनट की निरंतर रोशनी के बाद भी प्रारंभिक बिजली रूपांतरण दक्षता का लगभग 40% तक बरकरार रहा। ये परिणाम HTL की चालकता और गतिशीलता में सुधार के लिए व्यवस्थित रणनीति का प्रदर्शन करते हैं जिसके परिणामस्वरूप चार्ज वाहक का कुशल निष्कर्षण, डिवाइस प्रदर्शन और स्थिरता बढ़ी है।

g-$C_3N_4$ NS का उपयोग इलेक्ट्रॉन और होल के निष्कर्षण के लिए पॉलीमर सोलर सेल में चार्ज-चयनात्मक इंटरफ़ेस परत के रूप में किया गया था । NS की कोटिंग के बाद आईटीओ का कार्य-फलन 4.94 eV से घटकर 4.43 eV हो गया। हालांकि, यूवी-ओज़ोन (UV-$O_3$) उपचार के साथ कार्य-फलन में क्रमिक वृद्धि देखी गई और इष्टतम उपचार अवधि (10 min) के लिए, यह 5.25 eV तक पहुंच जाता है । इससे पता चलता है कि अपने प्राचीन रूप में, यानी अनुपचारित ITO/g-$C_3N_4$ NS, यह इलेक्ट्रॉनों को निकाल सकता है और इसलिए इनवर्टेड पॉलीमर सोलर सेल के लिए कैथोड इंटरफ़ेस परत के रूप में उपयोग किया जा सकता है, जबकि UV-$O_3$ उपचार के बाद यह होल के निष्कर्षण की सुविधा प्रदान करता है और इस तरह इसका उपयोग कन्वेंशनल डिवाइस आर्किटेक्चर में एनोड इंटरफ़ेस परत के रूप में किया जा सकता है। यह PTB7-Th:$PC_{71}BM$ के सक्रिय परत संयोजन के साथ प्रदर्शित किया गया है। चार्ज सेलेक्टिव इंटरफेस लेयर के रूप में g-$C_3N_4$ NS वाले इनवर्टेड और कन्वेंशनल दोनों डिवाइस के लिए समान शॉर्ट सर्किट करंट घनत्व (15.65 mA $cm^{-2}$) और पावर रूपांतरण क्षमता (5.60% और 6.05%) देखी गई है। UV-$O_3$ उपचार ऑक्सीजन परमाणुओं के समावेश के कारण सतह द्विध्रुवीय को प्रेरित करके g-$C_3N_4$ NS पतली परत को संशोधित करता है जो मुख्य रूप से कार्य-फलन के उनके स्विचिंग व्यवहार के लिए जिम्मेदार है। यह अध्ययन समाधान-संसाधित पॉलीमर सोलर सेल के लिए

चार्ज-चयनात्मक इंटरफ़ेस परत (CIL/AIL) के रूप में g-$C_3N_4$ NS की दोहरीकार्यात्मकता को प्रदर्शित करता है।

g-$C_3N_4$ में अद्वितीय ऑप्टोइलेक्ट्रॉनिक गुण हैं, हालांकि, इसकी पतली-परत कि विशेषताओं को अच्छी तरह से खोजा नहीं गया था, इसलिए, अर्धचालक उपकरण अनुप्रयोगों के लिए इसका उपयोग सीमित रह गया है। यहां, हमने थर्मल वाष्पीकरण के माध्यम से 10 nm की पतली परत बनाई और संरचनात्मक, ऑप्टिकल, विद्युत और परावैद्युत गुणों पर UV-$O_3$ उपचार के प्रभाव का अध्ययन किया। फिल्म विशेषताओं में व्यवस्थित सुधार 10 मिनट की उपचार अवधि तक देखा गया था। हालांकि, उपचार की अवधि में और वृद्धि के परिणामस्वरूप पतली-परत के गुणों पर हानिकारक प्रभाव पड़ा। यह देखा गया कि थर्मल वाष्पीकरण और UV-$O_3$ उपचार के बाद पतली परत के लिए संरचना को अच्छी तरह से बरकरार रखा गया था, जैसा कि थोक g-$C_3N_4$ की है। इसके अलावा, थर्मल रूप से वाष्पित परत में 1 nm से नीचे r.m.s खुरदरापन के साथ एक स्मूथ सतह का प्रदर्शन किया और उपचार के बाद फिल्म की स्मूथनेस और बढ़ गई। उत्सर्जन गुणों और उरबैक ऊर्जा विश्लेषण ने कम चार्ज वाहक पुनर्संयोजन का सुझाव दिया, जिससे UV-$O_3$ उपचार के बाद पतली परत में बेहतर फोटो-प्रेरित चार्ज पृथक्करण हुआ। उपचारित पतली परत ने एक कम करंट के रिसाव का प्रदर्शन किया जिसके परिणामस्वरूप एक उच्च परावैद्युत स्थिरांक और छोटा नुकसान हुआ।

उपरोक्त सभी परिणाम बताते हैं कि g-$C_3N_4$ नैनोस्ट्रक्चर और पतली परत में आकर्षक संरचनात्मक, ऑप्टिकल और विद्युत गुण होते हैं जो पॉलीमर सोलर सेल के प्रदर्शन में काफी सुधार कर सकते हैं। हालांकि, इसकी कई अनूठी विशेषताएं अन्य अर्धचालक उपकरणों में भी उपयोग की दिशा में मार्ग प्रशस्त करती हैं, जैसे पेरोवस्काइट सोलर सेल, प्रकाश उत्सर्जक डायोड, फोटोडिटेक्टर, वियरेबल टेक्नॉलॉजी उपकरण, ऊर्जा भंडारण उपकरण आदि।

# Table of Contents

# List of Figures

**Chapter 1**

**Chapter 2**



**Chapter 3**

## Chapter 4

## Chapter 5

## Chapter 6



## Appendix A

## Appendix B

# List of Tables

# Abbreviations and Symbols

| | |
|---|---|
| A | Acceptor |
| a-Si | Amorphous Silicon |
| AFM | Atomic Force Microscopy |
| Ag | Silver |
| Al | Aluminum |
| AM | Air Mass |
| CdTe | Cadmium Telluride |
| CdS | Cadmium Sulphide |
| CIGS | Copper Indium Gallium Selenide |
| CNT | Carbon Nanotube |
| D | Donor |
| DI | Deionized |
| DMF | Dimethyl formamide |
| DSSC | Dye Sensitized Solar cell |
| ETL | Electron Transport Layer |
| FF | Fill Factor |
| FTIR | Fourier Transform Infrared |
| g-$C_3N_4$ | Graphitic Carbon Nitride |
| GaAs | Gallium Arsenide |
| HOMO | Highest Occupied Molecular Orbit |
| HTL | Hole Transport Layer |
| IEA | International Energy Agency |
| IPA | Iso-Propyl Alcohol |

| | |
|---|---|
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| kWh | kilo watt-hours |
| LUMO | Lowest Unoccupied Molecular Orbital |
| LiF | Lithium Fluoride |
| MTJ | Metric Tonne Joule |
| MPP | Maximum Power Point |
| NS | Nanosheets |
| NREL | National Renewable Energy Laboratory |
| OPV | Organic Photovoltaic |
| OSC | Organic Solar cell |
| P3HT | Poly(3-hexylthiophene) |
| $PC_{71}BM$ | [6,6]-Phenyl-C71-butyric acid methyl ester |
| PCE | Power Conversion Efficiency |
| PHJ | Planar heterojunction |
| PL | Photoluminescence |
| PSC | Perovskite solar cell |
| PTFE | Polytetrafluoroethylene |
| PV | Photovoltaic |
| QDs | Quantum dots |
| r.m.s. | Root-mean-square |
| SAED | Selected Area Electron Diffraction |
| SEM | Scanning Electron Microscopy |
| SCLC | Space Charge Limited Current |
| Si | Silicon |
| TCO | Transparent Conducting Oxide |

| | |
|---|---|
| XRD | X-Ray Diffraction |
| q | Charge of electron |
| C | Capacitance |
| $k_B$ | Boltzmann constant |
| $\varepsilon_0$ | Free space permittivity |
| $\varepsilon$ | Relative dielectric constant |
| $\mu$ | Mobility |
| $\eta$ | Efficiency |
| eV | Electron volt |
| ml | Millilitre |
| µm | Micrometer |
| mA | Milliampere |
| meV | Milli electron volt |
| mg | Milligram |
| Nm | Nanometer |
| $V_{bi}$ | Built-in-voltage |
| $J_{max}$ | Current density at MPP |
| $V_{max}$ | Voltage at MPP |
| $J_{sc}$ | Short circuit current density |
| $V_{oc}$ | Open circuit voltage |
| Z’ | Real impedance (resistance) |
| Z” | Imaginary impedance (reactance) |
| $\tau$ | Time constant |
| $\Omega$ | Ohm |