DEVELOPMENT OF DUAL PIEZOELECTRIC/TRIBOELECTRIC NANOCOMPOSITES FOR SENSING AND ENERGY HARVESTING APPLICATIONS

NADEEM TARIQ BEIGH

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MARCH 2024

DEVELOPMENT OF DUAL PIEZOELECTRIC/TRIBOELECTRIC NANOCOMPOSITES FOR SENSING AND ENERGY HARVESTING APPLICATIONS

by

NADEEM TARIQ BEIGH

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

Submitted

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

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

March 2024

THESIS CERTIFICATE

This is to certify that the thesis titled **Development of Dual Piezoelectric/Triboelectric Nanocomposites for Sensing And Energy Harvesting Applications**, submitted by **Nadeem Tariq Beigh(2018EEZ8567)**, to the Indian Institute of Technology, Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy(Ph.D.)**, is a bonafide record of the research work done by him under our supervision. The contents of this thesis, in full or in parts, have not been submitted to any other Institute or University for the award of any degree or diploma.

Dhiman Mallick

Prof. Dhiman Mallick
Department of Electrical Engineering,
Indian Institute of Technology Delhi.

Place: New Delhi

Date: March 11, 2024

ACKNOWLEDGEMENTS

"Allah will raise in rank those of you who have faith and those who have been given knowledge"
(Holy Quran 58:11)

In the culmination of this arduous intellectual journey, I stand on the shoulders of my peers, supported by the unwavering encouragement and assistance of countless individuals and institutions who have made this endeavor possible. Their contributions, both seen and unseen, have enriched my scholarly pursuits and added depth to the tapestry of this thesis.

First and foremost, I extend my profound gratitude to my dedicated supervisor, Prof. Dhiman Mallick. Your boundless wisdom, unwavering guidance, and unrelenting belief in my abilities have been the compass that steered me through the complex labyrinth of research. Your passion for the subject matter and commitment to academic excellence have been a constant source of inspiration. I am grateful to have been your first PhD student and I will always be indebted to you for trusting me to be the foundation of your amazing group. I also extend my heartfelt thanks to the esteemed members of my SRC, Prof. Madhusudan Singh, Prof. Bhaskar Mitra, and Prof. Sitikantha Roy, whose insightful feedback and rigorous scrutiny have significantly elevated the quality of this work. Your collective expertise and critical perspectives have challenged me to push the boundaries of my research, ensuring its rigor and relevance. I am indebted to the Indian Institute of Technology Delhi for providing me with an intellectually stimulating and nurturing environment. The exceptional resources, libraries, and research facilities offered by the institute have been instrumental in shaping this thesis. I am equally grateful to the department of electrical engineering for fostering a culture of academic excellence and innovation. The financial support from MHRD, I-Hub Foundation for Cobotics, Technology Innovation Hub, SERB-DST has been instrumental in facilitating my research, and I am deeply appreciative of their investment in my academic journey. I would like to thank Prof. Soutik Betal for his continuous appreciation, support and delightful discussion about research and life. I am grateful to Prof. Ankur Goswami, Prof. Samaresh Das, Prof. Pushparaj Singh, Prof. Wazed Ali, Prof. Neeraj Khare, Prof. Shahid Mallick, and Prof. Bhanu for their unwavering support and suggestions.

I have been fortunate enough to work with my younger brother Faizan Tariq and I am glad that he has been an important part of my PhD journey. I appreciate all the fruitful discussions and trouble shooting we did together. To my family, whose unwavering love and support have been my anchor in the stormy seas of academia, I extend my deepest gratitude. Your sacrifices, understanding, and encouragement have sustained me through the highs and lows of this pursuit. To my friends and fellow scholars, who have shared this journey with me, offering camaraderie, motivation, and moments of respite, I am thankful beyond words. Your collective wisdom and camaraderie have enriched my life immeasurably. Finally, to the countless individuals who volunteered their time, insights, and expertise in the course of my research, This thesis is the culmination of a collective effort, a tapestry woven from the threads of guidance, support, and inspiration generously provided by those mentioned above and countless others. As I embark on the next phase of my academic and professional journey, I carry with me the invaluable lessons and enduring connections forged during this remarkable undertaking. With heartfelt gratitude. I am indebted to life.

Ps: I would like to thank my dearest Omais, Danish, Zarkab, and Asifa. To my IML and VDTT fellows, Pankaj, Vinit, Dibyajyoti, Nandan, Shalini, Pratibha, Sourav, Ajay, Trisha, Satish, Vikram, Parvez, Mujeeb, Khanjan, Manu, Tamkeen, Pinky, Shubham, and all my lab mates, lab staff and aides for their support. Thank you making my journey blissful.

Nadeem Tariq Beigh
Department of Electrical Engineering,
Indian Institute of Technology Delhi.

Place: New Delhi Date: March 11, 2024

ABSTRACT

KEYWORDS: Piezoelectric Energy Harvesters/Sensors, Triboelectric Energy Harvesters/Sensors, Photopatternable Nanocomposites, Self-Powered Sensing, Hybrid Energy Harvesters/Sensors, Machine learning

The dawn of the Internet of Things (IoT) represents a monumental shift in the way we connect and interact with devices and the environment around us. One pivotal factor in the rapid growth of IoT is the significant contribution of low-power electronics. These energy-efficient components enable the deployment of IoT devices that can operate on minimal power resources, enhancing their reliability and scalability. As a result, IoT applications have flourished across various sectors, from smart homes and cities to industrial automation and healthcare, ushering in a new era of connectivity and data-driven insights that continue to reshape our world. However, the surge in IoT nodes has exponentially increased the number of wireless, remotely placed "IoT nodes" that should operate independently with minimal maintenance. The dependence on batteries is not feasible for the predicted growth of IoT technologies as it limits its multi-domain expansion. Since sensors are a vital component of IoT node, transforming the passive-energy consuming sensors into active-self powered sensors(or harvesters) provides a suitable solution and creates a transformative shift towards a greener world. Tapping the "always available" mechanical energy in the form of biomechanical and ambient vibrations opens up new avenues for self-powered sensing. The low-frequency (< 200 Hz) vibrational energy can be efficiently harvested using a flexible piezoelectric, and triboelectric harvesters built from a diverse set of materials, including polymer nancomposites and nano-filler combinations.

The majority of the published research on piezoelectric or triboelectric harvesters discusses the methodologies that are CMOS incompatible, expensive, complex, single transduction, and restricted to a small area harvesting/sensing. However, there are no reported studies on the development of novel material and their optimization as a CMOS compatible, simple, low-cost, dual transduction, and large area harvester/sensor that is suitable for self-powered IoT nodes. This thesis explores a series of research works associated with dual transduction nanocomposites and their process optimization to develop energy harvesters/sensors for extracting ambient and biomechanical energy. This thesis uncovers the possibility of dual transduction in photopatternable and non-photopatternable nanocomposites with applications in energy harvesting, impact loss compensation, machine learning integrated sensors, etc.

This thesis reports the following significant findings:

1. The optimization of photopatternability and piezoelectricity in %weight ratio varying

ZnO/SU-8 and BTO/SU-8 nanocomposites. The thesis uncovers the optimum weight ratio value of 15% and 20% for ZnO/SU-8 and BTO/SU-8 nanocomposites, respectively. At these values, they show optimum results with good piezoelectric response and UV transmittance, allowing reliable lithography of the nanocomposites. This optimization allows the development of flexible biomechanical energy harvesters with output power of $223\mu W$ and $642\mu W$ for ZnO/SU-8 and BTO/SU-8, respectively.

2. The exploration of inherent triboelectric nature of BTO/SU-8 nanocomposites and the effect of %weight ratio on its triboelectric transduction. The performance enhancement techniques on the form of UV exposure and graphene doping are also presented. The 1% graphene doped 20% BTO/SU-8 shows a high triboelectric shift with a charge retention measure of 85mV that enables the design of a dual transduction energy harvester with an power density of $0.65\mu W\text{cm}^{-2}$ at 0.75g acceleration amplitude.

3. The development of a novel pixelated tactile pressure sensor with dual transduction capabilities using the optimized 20% BTO/SU-8 composites as the active layer. The sensor shows a sensitivity of 34 mV kPa^{-1} for deep linear region and 2.7 mV kPa^{-1} for the linear region over a pressure range of 0–170 kPa. The sensor shows a negligible hysteresis with an average deviation of 2.7%. A sensor-ML integration is also presented that allows effective utilization of this sensor for hind foot deformity detection, activity monitoring and grip strength assessment with 98.5%, 98.3% and 93.75% model accuracy, respectively.

4. The concept of dual transduction in a single thin film is presented as a possible solution to impact losses in impact driven piezoelectric energy harvesters.The proposed impact driven energy harvesters is capable of compensating impact-induced energy loss by a 100% power integral recovery at $< 1.5g$ acceleration amplitude by suitably designing the device that incorporates a dual piezoelectric/triboelectric transduction-based nanocomposite as the active layer. This hybrid design demonstrates 3.3 times power gain and the bandwidth broadening of $5.4Hz$ at $1g$.

5. The exploration of dual transduction in BTO/P(VDF-TrFE) and the effect of %weight ratio on the β-phase as well as triboelectric shift. 15% weight ratio of BTO in 20%P(VDF-TrFE) nanocomposites film shows the highest piezoelectric co-efficient of 0.58nm/V. The addition of BTO in 20% P(VDF-TrFE) results in a triboelectric shift from a tribonegative to tribopositive nanocomposite. The surface potential shifts from -382.5mV to 495 mV in 20% P(VDF-TrFE) and 15% BTO/20% P(VDF-TrFE). The charge retention metric ΔV_{200} also decreases from 150mV to 60mV in 20% P(VDF-TrFE) and 15% BTO/20% P(VDF-TrFE), indicating the improvement in charge retention in 15% BTO/20% P(VDF-TrFE).

सार

कीवर्ड: पीजोइलेक्ट्रिक एनर्जी हार्वेस्टर/सेंसर, ट्राइबोइलेक्ट्रिक एनर्जी हार्वेस्टर/सेंसर, फोटोपैटर्नेबल नैनोकम्पोजिट, स्व-संचालित सेंसिंग, हाइब्रिड ऊर्जा हार्वेस्टर/सेंसर, मशीन लर्निंग

इंटरनेट ऑफ थिंग्स (IoT) की शुरुआत हमारे उपकरणों और हमारे आस-पास के वातावरण से जुड़ने और बातचीत करने के तरीके में एक महत्वपूर्ण बदलाव का प्रतिनिधित्व करती है। IoT की तीव्र वृद्धि में एक महत्वपूर्ण कारक कम-शक्ति वाले इलेक्ट्रॉनिक्स का महत्वपूर्ण योगदान है। ये ऊर्जा-कुशल घटक IoT उपकरणों की तैनाती को सक्षम करते हैं जो न्यूनतम बिजली संसाधनों पर काम कर सकते हैं, जिससे उनकी विश्वसनीयता और स्केलेबिलिटी बढ़ जाती है। परिणामस्वरूप, IoT एप्लिकेशन स्मार्ट घरों और शहरों से लेकर औद्योगिक स्वचालन और स्वास्थ्य देखभाल तक विभिन्न क्षेत्रों में फले-फूले हैं, जिससे कनेक्टिविटी और डेटा-संचालित अंतर्दृष्टि के एक नए युग की शुरुआत हुई है जो हमारी दुनिया को नया आकार देना जारी रखता है। हालाँकि, IoT नोड्स में वृद्धि ने वायरलेस, दूर से रखे गए "IoT नोड्स" की संख्या में तेजी से वृद्धि की है, जिन्हें न्यूनतम रखरखाव के साथ स्वतंत्र रूप से काम करना चाहिए। IoT प्रौद्योगिकियों की अनुमानित वृद्धि के लिए बैटरियों पर निर्भरता संभव नहीं है क्योंकि यह इसके बहु-डोमेन विस्तार को सीमित करती है। चूंकि सेंसर IoT नोड का एक महत्वपूर्ण घटक हैं, इसलिए निष्क्रिय-ऊर्जा खपत करने वाले सेंसर को सक्रिय-स्वयं संचालित सेंसर (या हार्वेस्टर) में बदलना एक उपयुक्त समाधान प्रदान करता है और एक हरित दुनिया की ओर एक परिवर्तनकारी बदलाव पैदा करता है। बायोमैकेनिकल और परिवेशीय कंपन के रूप में "हमेशा उपलब्ध" यांत्रिक ऊर्जा का दोहन स्व-संचालित संवेदन के लिए नए रास्ते खोलता है। कम-आवृत्ति (<200 हर्ट्ज) कंपन ऊर्जा को लचीले पीजोइलेक्ट्रिक और पॉलिमर नैनकम्पोजिट्स और नैनो-फिलर संयोजनों सहित सामग्रियों के विविध सेट से निर्मित ट्राइबोइलेक्ट्रिक हार्वेस्टर का उपयोग करके कुशलतापूर्वक काटा जा सकता है।

पीजोइलेक्ट्रिक या ट्राइबोइलेक्ट्रिक हार्वेस्टर पर अधिकांश प्रकाशित शोध उन पद्धतियों पर चर्चा करते हैं जो सीएमओएस असंगत, महंगी, जटिल, एकल ट्रांसडक्शन और एक छोटे क्षेत्र में कटाई/संवेदन तक सीमित हैं। हालाँकि, नई सामग्री के विकास और सीएमओएस संगत, सरल, कम लागत, दोहरे ट्रांसडक्शन और बड़े क्षेत्र हार्वेस्टर/सेंसर के रूप में उनके अनुकूलन पर कोई रिपोर्ट नहीं की गई है जो स्व-संचालित आईओटी नोड्स के लिए उपयुक्त है। यह थीसिस परिवेश और बायोमैकेनिकल ऊर्जा निकालने के लिए ऊर्जा हार्वेस्टर/सेंसर विकसित करने के लिए दोहरे ट्रांसडक्शन नैनोकम्पोजिट और उनकी प्रक्रिया अनुकूलन से जुड़े शोध कार्यों की एक श्रृंखला की पड़ताल करती है। यह थीसिस ऊर्जा संचयन, प्रभाव हानि क्षतिपूर्ति, मशीन लर्निंग एकीकृत सेंसर आदि में अनुप्रयोगों के साथ फोटोपैटर्नेबल और गैर-फोटोपैटर्नेबल नैनोकम्पोजिट में दोहरे पारगमन की संभावना को उजागर करती है।

यह थीसिस निम्नलिखित महत्वपूर्ण निष्कर्षों की रिपोर्ट करती है:

I. %वजन में फोटोपैटर्नबिलिटी और पीजोइलेक्ट्रिसिटी का अनुकूलन ZnO/SU-8 और BTO/SU-8 नैनोकम्पोजिट का अनुपात अलग-अलग है। थीसिस अन- ZnO/SU-8 के लिए 15% और 20% के इष्टतम वजन अनुपात मान को कवर करता है और क्रमशः बीटीओ/एसयू-8 नैनोकम्पोजिट। इन मूल्यों पर, वे दिखाते हैं अच्छी पीज़ोइलेक्ट्रिक प्रतिक्रिया और यूवी संप्रेषण के साथ इष्टतम परिणाम,

नैनोकम्पोजिट्स की विश्वसनीय लिथोग्राफी की अनुमति देना। यह अनुकूलन लचीले बायोमैकेनिकल ऊर्जा हार्वेस्टर के विकास की अनुमति देता है ZnO/SU-8 और BTO/SU-8 के लिए 223μW और 642μW की आउटपुट पावर.

II. उन्होंने बीटीओ/एसयू-8 नैनोकॉम की अंतर्निहित ट्राइबोइलेक्ट्रिक प्रकृति की खोज की- सकारात्मकताएं और इसके ट्राइबोइलेक्ट्रिक ट्रांसडक्शन पर% वजन अनुपात का प्रभाव। यूवी एक्सपोजर के रूप में प्रदर्शन बढ़ाने की तकनीकें और ग्राफीन डोपिंग भी प्रस्तुत की जाती है। 1% ग्राफीन को 20% डोप किया गया बीटीओ/एसयू-8 चार्ज प्रतिधारण माप के साथ एक उच्च ट्राइबोइलेक्ट्रिक शिफ्ट दिखाता है 85mV का जो दोहरे पारगमन ऊर्जा हार्वेस्टर के डिज़ाइन को सक्षम बनाता है 0.75g त्वरण आयाम पर 0.65μW/cm^2 की शक्ति घनत्व के साथ।

III. दोहरे के साथ एक नवीन पिक्सेलयुक्त स्पर्श दबाव सेंसर का विकास अनुकूलित 20% बीटीओ/एसयू-8 कंपोजिट का उपयोग करके ट्रांसडक्शन क्षमताएं सक्रिय परत के रूप में. सेंसर 34 mV kPa^{-1} की संवेदनशीलता दिखाता है गहरे रैखिक क्षेत्र और दबाव पर रैखिक क्षेत्र के लिए 2.7 mV kPa^{-1} 0-170 केपीए की सीमा। सेंसर एक के साथ नगण्य हिस्टैरिसीस दिखाता है 2.7% का औसत विचलन. एक सेंसर-एमएल एकीकरण भी प्रस्तुत किया गया है पिछले पैर की विकृति का पता लगाने के लिए इस सेंसर के प्रभावी उपयोग की अनुमति देता है, 98.5%, 98.3% और के साथ गतिविधि निगरानी और पकड़ शक्ति मूल्यांकन क्रमशः 93.75% मॉडल सटीकता।

IV. एक पतली फिल्म में दोहरे पारगमन की अवधारणा को इस प्रकार प्रस्तुत किया गया है प्रभाव चालित पीजोइलेक्ट्रिक ऊर्जा हानि में प्रभाव हानि का संभावित समाधान- वेस्टर्स। प्रस्तावित प्रभाव चालित ऊर्जा हार्वेस्टर काम करने में सक्षम है-100% पावर इंटीग्रल रिकवरी द्वारा प्रभाव-प्रेरित ऊर्जा हानि को दंडनीय बनाना डिवाइस को उपयुक्त रूप से डिज़ाइन करके <1.5 ग्राम त्वरण आयाम पर- एक दोहरी पीजोइलेक्ट्रिक/ट्राइबोइलेक्ट्रिक ट्रांसडक्शन-आधारित नैनोकॉम को कॉर्पोरेट करता है- सक्रिय परत के रूप में स्थित। यह हाइब्रिड डिज़ाइन 3.3 गुना शक्ति प्रदर्शित करता है लाभ और बैंडविड्थ 1g पर 5.4Hz का विस्तार।

V. बीटीओ/पी (वीडीएफ-टीआरएफई) में दोहरे पारगमन की खोज और β-चरण के साथ-साथ ट्राइबोइलेक्ट्रिक शिफ्ट पर% वजन अनुपात का प्रभाव। 15% 20%P(VDF-TrFE) नैनोकम्पोजिट फिल्म में BTO का वजन अनुपात दिखाता है 0.58nm/V का उच्चतम पीज़ोइलेक्ट्रिक गुणांक। में बीटीओ को शामिल किया गया 20% P(VDF-TrFE) के परिणामस्वरूप ट्राइबोइलेक्ट्रिक शिफ्ट ट्राइबोनगेटिव से होता है ट्राइबोपॉजिटिव नैनोकम्पोजिट। सतह की क्षमता -382.5mV से बदल जाती है 20% P(VDF-TrFE) और 15% BTO/20% P(VDF-TrFE) में 495 mV तक। चार्ज प्रतिधारण मीट्रिक ΔV_{200} भी 150mV से घटकर 60mV हो जाता है 20% P(VDF-TrFE) और 15% BTO/20% P(VDF-TrFE) में, जो दर्शाता है 15% BTO/20% P(VDF-TrFE) में चार्ज प्रतिधारण में सुधार।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF TABLES

LIST OF FIGURES

ABBREVIATIONS

MEMS	Micro Electromechanical Systems
VEH	Vibrational Energy Harvesting
VEHs	Vibrational Energy Harvesters
BTO	Barium Titanate
FEM	Finite Element Method
IoT	Internet of Things
AI	Artificial Intelligence
ML	Machine Learning
TEGs	Triboelectric Generators
TENGs	Triboelectric Nanogenerators
PEGs	Piezoelectric Generators
PENGs	Piezoelectric Nanogenerators
DC	Direct Current
DC-TEG	Direct-Current Triboelectric Generator
UV	Ultra Violet
PP	Photo-Patternability
PET	Polyethylene Terephthalate
PDMS	Polydimethylsiloxane
CNTs	Carbon Nanotubes
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PVDF	Polyvinylidene Fluoride
XRD	X-ray Diffraction
SEM	Scanning Electron Microscopy
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscopy
ZnO	Zinc Oxide
KPFM	Kelvin Force Probe Microscopy
PFM	Piezo Force Microscopy
TrFe	Trifluoroethylene
ITO	Indium Titanium Oxide
Al	Aluminium
PCB	Printed Circuit Board
EMGs	Electromagnetic Generators
emf	Electromotive Force
MEH	Mechanical Energy Harvesters

UV-VIS	UV-Visible Infrared Spectroscopy
PR	Piezo-Response
ADC	Analog-to-Digital Converter
MUX	Multiplexer
CNN	Convolution Neural Network
PMU	Power Management Unit
AFM	Atomic Force Microscope
MoS_2	Molybdenum Disulfide
Cu	Copper
GaN	Gallium Nitride
PEH	Piezoelectric Energy Harvester
2-D	Two Dimensional
3-D	Three Dimensional
ode	Ordinary Differential Equations
DSO	Digital storage oscilloscope
DCP	Dickson Charge Pump
LED	Light Emitting Diode
MOS	Metal Oxide Semiconductor
RoC	Region of Compensation
RoiL	Region of Impact Loss
IDEH	Impact Driven Energy Harvester
H-IDEH	Hybrid Impact Driven Energy Harvester
P-IDEH	Piezoelectric Impact Driven Energy Harvester
L-PEH	Linear Piezoelectric Energy Harvester
C-TEH	Compensating Triboelectric Energy Harvester
SOI	Silicon on Insulator
PZT	Lead Zirconate Titanate
NW	Nano Wire
NP	Nano Particle
NF	Nano Filler
NG	Nano Generator
GO	Graphene Oxide
rGO	Reduced Graphene Oxide
FET	Field Effect Transistor
RIE	Reactive Ion Etching
ANN	Artificial Neural Network
SVM	Support Vector Machines
PI	Power Integral
IPA	Isopropyle Alcohol
DI	De-Ionised

EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
NIR	Near Infrared
ANN	Artificial Neural Network
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
MFP	Micro Force Probe
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
M-I-M	Metal-Insulator-Metal
NPl	Nano Platelets
PEP	Piezoelectric Pressure Sensor
TEP	Triboelectric Pressure Sensor
PGT	Polyethyleneglycol Terephthalate
PTI	Piezo-Tribo Imparter
IDC	Insulation-Displacement Connector
KNN	K-Nearest Neighbour
MLP	Multi-Layer Perceptron Neural Network
RAM	Random Access Memory
RMSPro	Root Mean Squared Propagation
Q-Factor	Quality Factor
FPC	Flexible Printed Circuit
NPID	Normalized Power Integral Density
LTO	Lithium Tantalate
LBO	Lithium Niobate
AlN	Aluminium Nitride
Mo	Molybdenum
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
DMSO	Dimethyl sulfoxide
Ag	Silver
Au	Gold
DMF	Dimethylformamide
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
GUI	Graphical User Interface

NOTATIONS

$V_{surface}$	Surface potential difference
Q	Charge
d_{ij}	Piezoelectric Strain Constant
$\Delta\sigma$	Applied Stress
V	Voltage
ϵ_{ij}^{T}	Permittivity at Constant Stress
s	Strain
T	Stress Vector
S^{E}	Elastic Compliance
D	Electrical Displacement
E	Electrical Field
g_{ij}	Piezoelectric Voltage Coefficient
$tan\delta$	Dissipation or Loss Factor
Q_m	Mechanical Quality Factor
k_{ij}	Electromechanical Coupling Coefficient
PD	Power Density
P_{max}	Maximum Power
ϕ_{Tr}	Material Work Function
e	Electronic Charge
V_{OC}	Open Circuit Voltage
V_{TENG}	Triboelectric Voltage
C_{TENG}	Triboelectric Capacitance
V_T	Thinner Volume
V_{SU8}	SU-8 Initial Volume
ρ_{SU8}	Density of SU-8
ρ_T	Density of Thinner
S_{RI}	% Solid content of SU-8
S_I	% Solid content of Final Solution
ϵ_{nc}	Permittivity of Nanocomposite
ϵ_p	Permittivity of Polymer Matrix
V_f	Volume Fraction
ΔV_{200}	Change in Triboelectric Surface Potential
Phi_{SAM}	Work Function of Sample
Phi_{AFM}	Work Function of AFM
J	Current Density
J_e	Externally Generated Current Density
$n.J$	Surface Normal Current Density
d	Thickness of the Nanocomposite
F_v	Applied Force
C	Elasticity Tensor

ρ_v	Volumetric Charge Density
P_{pze}	Piezoelectric Polarization
g_i	Triboelectric Air Gap
$EGND$	Common Ground Electrode
$ETRI$	Triboelectric Electrode
$EPZI$	Piezoelectric Electrode
NB	Naive Bayes Classifier
I_{pz}	Piezoelectric Current
I_{tr}	Triboelectric Current
I_{hyb}	Hybrid Current
E_{nc}	Electric Field Across the Nanocomposite
A	Effective Area of Contact
$q(t)$	Instantaneous Charge
$v(t)_{tr}$	Instantaneous Triboelectric Voltage
R_t	Triboelectric Load Resistance
δ	Thickness of Nanocomposite
E_{air}	Electric Field Across the Air Gap
z	Cantilever Free End Displacement
m_{eff}	Effective Mass of Cantilever
k_{eff}	Effective Cantilever Stiffness
c_b	Damping Ratio
Δ	Initial Triboelectric Gap
θ	Piezoelectric Coupling Coefficient
K_{imp}	Effective Stiffness of Impact Electrode
c_i	Damping Ratio of Impacting Electrode
C_p	Piezoelectric Capacitance
R_p	Piezoelectric Load Resistance
a	Acceleration Amplitude
ζ	Damping Coefficient
ω_d	Resonant Frequency
t_d	Time Period of Oscillation
α^2	Electromechanical Coupling Coefficient
ΔPI	Change in Power Integral
PI_{CTEH}	Power Integral for CTEH
PI_{PIDEH}	Power Integral for PIDEH
PI_{LPEH}	Power Integral for LPEH
PI_{CTEH}	Power Integral for CTEH
α	α-Phase
β	β-Phase