ADVANCING PATHOGEN DIAGNOSTICS USING SURFACE ENHANCED RAMAN SPECTROCSOPY (SERS) WITH GLANCING ANGLE DEPOSITION FABRICATED SUBSTRATES FOR MICROBIAL DETECTION

Sneha Senapati

SCHOOL OF INTERDISCIPLINARY RESEARCH (SIRe)

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

SEPTEMBER 2025

ADVANCING PATHOGEN DIAGNOSTICS USING SURFACE ENHANCED RAMAN SPECTROCSOPY (SERS) WITH GLANCING ANGLE DEPOSITION FABRICATED SUBSTRATES FOR MICROBIAL DETECTION

by

Sneha Senapati

School of Interdisciplinary Research (SIRe)

Submitted

in fulfilment of requirements of degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

September 2025

Dedication

This dissertation is dedicated to my parents, ***Mr. Pitabash Senapati*** and ***Mrs. Pushpa Senapati***. It is their blessings, encouragement, and constant love that has brought me here. Their support and understanding have sustained me throughout my life. I will never be able to repay the blessings and sacrifices they have bestowed upon me. The living GOD of my life.

CERTIFICATE

I am satisfied that the thesis entitled **"ADVANCING PATHOGEN DIAGNOSTICS USING SURFACE ENHANCED RAMAN SPECTROCSOPY (SERS) WITH GLANCING ANGLE DEPSOSITION FABRICATED SUBSTRATES FOR MICROBIAL DETECTION"** submitted by Ms. Sneha Senapati is worthy of consideration for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** and is a record of original and bonafide research work carried out by him under our supervision. The results contained in it have not been submitted in part or full to any other university or institute for the award of any degree/diploma.

Prof. J.P. Singh
Department of Physics
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi-110016, India

Dr. Smita S. Kulkarni
Former Emeritus Scientist
Former Head & Scientist G
Indian Council of Medical Research
New Delhi-110029, India

Date: 8th September 2025

ACKNOWLEDGEMENTS

The journey of this doctoral thesis might have been a fond illusion without the contribution and support from many inspiring individuals that create a productive environment for me to work in. Therefore, I would like to express my sincere gratitude to all the people who contributed to forming such a stimulating atmosphere that helped me over the years to complete my work successfully.

Firstly, I wish to acknowledge my sincere gratitude towards my thesis supervisor ***Prof. J.P. Singh and Dr. Smita S. Kulkarni****, who contributed significantly to shaping and guiding the direction for my thesis work. I am profoundly grateful to both for providing me with an environment where I learned from their knowledge, experience and wisdom that enabled me to complete this study. They have always inspired me with his endless patience, in-depth knowledge, and dedication to accomplish tasks at stipulated time. The allegiance with which they handle such a large group and are always willing to give new ideas and implement them is highly motivational. They have been my guiding stars for both professional and personal life. I am lucky to have them both as my supervisors.*

Besides my supervisors, I sincerely thank and appreciate the efforts of the SRC members, ***Prof. Neeraj Kare****,* ***Prof. Sunil Kumar,*** *and* ***Prof. Anuj Dhawan,*** *for their ever-helping approach and supportive nature.*

I am thankful to ***Prof. Rajendra Singh, Prof. Hemant K Kashyap, Prof. Nilanjan Senroy, and Prof. B. Premachandran*** *Head of the Department, School of Interdisciplinary Research, IIT Delhi, for providing necessary facilities.*

I express my deep gratitude towards ***Prof. Neetu Singh*** *(Center for Biomedical Engineering, IIT Delhi),* ***Dr. Vidya Arankalle (****Interactive Research School for Health Affairs (IRSHA), Pune****),* ***Dr. Rashmi Virkar (****IRSHA, Pune****),* ***Prof. Ishaan Gupta (****Centre for Biochemical Engineering and Biotechnology, IIT Delhi****), Dr. B.R. Mirdha*** *(Professor of Microbiology, All India Institute for Medical Sciences (AIIMS) Delhi) for providing their guidance and support throughout my Ph.D. journey.*

I also thank ***Dr. Pradeep Singh*** *(NRF, IIT Delhi) and* ***Dr. Sakshi Kapoor*** *(NRF, IIT Delhi), who performed many experiments along with me and provided valuable suggestions on writing and understanding many aspects of research. I must not forget* ***Dr. Yogita Maithani****, who has constantly been my guiding light throughout my journey. An always go-to senior and friend who holds a special place in my heart. I gratefully acknowledge the* ***Nanoscale Research Facility (NRF)*** *and* ***Central Research Facility (CRF)*** *at the Indian Institute of Technology Delhi for providing experimental facilities during this course of work.*

I feel fortunate to be associated with ***GLAD and Nano-CVD Lab****, which brings along an immense history of research and a tradition of dedication and innovation. I would also like to thank my seniors* ***Dr. Sarjana Yadav, Dr. Jyoti Yadav, Dr. Jamal Ahmad Khan, Dr. Arvind Kaushik*** *and my lab mates,* ***Dr. Siddharth Rana, Shivam Singh, C.M. Vidhya, Lakshay Bharadwaj, Debottam Dutta,***

Simranjeet Kaur, Deepali, Vandana and Priyanka *for their encouragement and scientific discussions. I wish to extend my thanks and regards* ***Mrs. Jyoti Choudhury*** *who has always been helping hand in technical and non-technical aspects of research. Also, without her as a very special friend and well-wisher this journey would have been impossible. I am obliged to be associated with such a large group and helping colleagues at GLAD and Nano-CVD Lab.*

My special thanks to my collaborators ***Dr. Manleen Kaur, Mr. Rajan and Mr. Aditya Singh*** *for their endeavoring support and help throughout the PhD journey.*

I wish to extend heartfelt thanks to ***Dr. Arvind Kaushik*** *for being by my side during the peak times and being a great collaborator and friend. Also, my special thanks to my friend at IIT Delhi* ***Dr. Siddharth, Mr. Sandeep*** *and* ***Ms. Akshi****. And my very special and lovely roommates* ***Mrs. Anshika, Ms. Tamkeen, Ms. Hirah, Ms. Anam,*** *for their constant presence. I am deeply grateful to my everlasting, low maintenance friends* ***Ms. Nikita Nanaware, Dr. Pallavi****,* ***Dr. Monalisa, and my school friends*** *for their constant love, laughter, and unwavering support throughout this journey. Their friendship and support were a great source of encouragement and have spent the most enlightening time of my research life. I sincerely thank and acknowledge the useful comments and insightful discussions that have helped me throughout my doctorate journey.*

I am delighted to express my sincere appreciation to ***my family*** *for their love, support and understanding that allowed me to nurture my dream and keep looking forward to more exceptional achievements in the future. I am incredibly grateful to*

Babu *and* ***Maa*** *and my siblings,* ***Dr. Sriya and Mr. Subham,*** *who encouraged and helped me at every stage of my personal and academic life and longed to see this achievement come true.*

I gratefully acknowledge the IIT Delhi for providing funding support and Senior Research Fellowship for this study.

Above all, I owe it all to Almighty God and ***my late grandparents*** *for immense blessings and granting me the wisdom, health, and strength to complete this task and enabling me to compile it.*

Sneha Senapati

Date*: 08-09-2025* ***Place****: New Delhi*

ABSTRACT

The relentless rise of infectious diseases, the global threat of antimicrobial resistance (AMR), and the continuous emergence of viral variants have created an urgent demand for rapid, ultrasensitive, and cost-effective diagnostic technologies. Traditional diagnostic tools, while effective, often fall short in sensitivity, speed, and adaptability, especially in resource-limited settings. In this context, Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS) has emerged as a transformative analytical technique, capable of detecting molecular signatures at ultralow concentrations with high specificity and rapid turnaround times. This thesis presents a comprehensive development of next-generation SERS-based platforms by combining advanced nanofabrication, innovative substrate engineering, and cutting-edge machine learning algorithms. These platforms target the detection and differentiation of bacterial, viral, and parasitic pathogens, offering powerful solutions that bridge the critical gap between laboratory research and real-world clinical applications.

Firstly, we present the fabrication of a novel paper-based SERS substrate by integrating zigzag silver nanorods (AgNRs) onto simple office paper via the glancing angle deposition (GLAD) method. The porous and fibrous architecture of the paper provides an intrinsically high surface area and roughness, which, combined with the unique two-armed zigzag morphology of AgNRs, generates dense plasmonic hotspots, amplifying Raman signals significantly. This cellulose-AgNR hybrid substrate offers critical advantages, including flexibility,

biodegradability, and low manufacturing costs, addressing key limitations of conventional rigid substrates. Application of the platform to the detection of nosocomial infection-causing bacteria — *Pseudomonas aeruginosa, Escherichia coli,* and *Staphylococcus aureus* — demonstrated an impressive limit of detection (LOD) of 10^2 copies/mL. Notably, the SERS intensity recorded on the paper-based substrate was approximately ten-fold higher than that observed on conventional glass-based substrates. Furthermore, a clear spectral differentiation between Gram-positive and Gram-negative bacteria was achieved, highlighting the platform's diagnostic potential for broad-spectrum bacterial identification.

Building on this foundation, we expanded the utility of AgNR-based SERS platforms toward viral detection, focusing specifically on the differentiation of SARS-CoV-2 variants and co-variants. Pristine AgNR substrates fabricated via GLAD were employed for the sensitive detection and strain-level differentiation of clinically relevant variants, including Wild type, Kappa, Delta, and Omicron strains, and Omicron sub-variants BA.1, BA.2, BA.5, and XBB. However, the highly similar genetic and biochemical profiles of these variants posed significant challenges for traditional SERS analysis. To overcome this, machine learning (ML) algorithms were integrated with SERS data to extract subtle spectral variations beyond human discernment. Support Vector Machine (SVM) and Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) models were trained on SERS spectra obtained from 122 positive nasopharyngeal swab (NPS) samples, previously confirmed by next-generation sequencing (NGS). The SVM classifier

achieved a variant classification accuracy of 89% on the validation set, outperforming the BiLSTM model, which achieved 86%. When tested on an independent blind set, SVM and BiLSTM achieved accuracy of 75% and 70.09%, respectively. Moreover, for subvariants classification among Omicron strain, the SVM model achieved a remarkable 96% accuracy. These results demonstrate that coupling SERS with ML substantially enhances the resolution and precision of variant detection, offering a promising pathway for real-time epidemiological surveillance.

In parallel, recognizing the importance of rapid antimicrobial susceptibility testing (AST), we developed a novel bimetallic SERS substrate composed of gold nanoislands decorated onto silver nanorods (AuNI@AgNR), again fabricated using GLAD and thermal deposition. The addition of gold nanoislands not only enhanced the stability of the substrate against oxidation but also significantly improved plasmonic coupling, resulting in greater electromagnetic field enhancement. The AuNI@AgNR substrate enabled the detection of bacterial pathogens at ultra-low concentrations down to 1 CFU/mL, both in single and mixed bacterial cultures. The platform effectively distinguished between Gram-positive and Gram-negative bacteria and was used to determine the minimum inhibitory concentrations (MICs) for various bacterial strains in a rapid manner. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) further allowed clear classification between antibiotic-susceptible and resistant strains, underscoring the substrate's utility for rapid AMR profiling. Importantly, the ability to differentiate and monitor bacterial populations in polymicrobial infections

represents a major advancement toward real-world, point-of-care (POC) applications.

Lastly, to address the burden of parasitic infections, a portable SERS platform was developed for malaria detection in blood samples, exploiting the paramagnetic properties of hemozoin — a crystalline byproduct unique to the malaria parasite. Using AgNR substrates fabricated via GLAD, an external magnetic field of 0.3 T was applied during Raman measurements, resulting in a remarkable tenfold enhancement of the SERS signal intensity compared to non-magnetized measurements. This magnetic assistance allowed an unprecedented LOD of 10^{-14} M (approximately 6 parasites/μL), vastly surpassing conventional detection limits. Through systematic dilution studies, it was demonstrated that hemozoin signals dominated the SERS spectra as hemoglobin-associated peaks diminished, validating the preferential localization of hemozoin at electromagnetic hotspots under magnetic influence. Principal component analysis (PCA) of SERS spectra from healthy and malaria-positive whole blood and plasma samples revealed distinct clustering, demonstrating the reliability and robustness of this method. Notably, magnetized and non-magnetized malaria-positive samples occupied separate regions in PCA space, highlighting the significant impact of magnetic field enhancement on detection fidelity.

Overall, this thesis demonstrates the immense potential of integrating advanced nanomaterials, SERS techniques, and machine learning algorithms to establish powerful, flexible, and sensitive platforms for the detection of bacterial, viral, and

parasitic pathogens. The developed strategies not only push the boundaries of sensitivity and specificity but also pave the way toward real-world applications in clinical diagnostics, epidemic surveillance, and antimicrobial stewardship. Future directions of this work involve the translation of these platforms into fully integrated portable devices, further improving accessibility, affordability, and applicability in resource-limited settings.

सार

संक्रामक रोगों की निरंतर बढ़ती घटनाएँ, एंटीमाइक्रोबियल रेज़िस्टेंस (AMR) का वैश्विक खतरा, और लगातार उभरते नए वायरल वेरिएंट्स ने तीव्र, अति-संवेदनशील तथा किफ़ायती डायग्नोस्टिक तकनीकों की तत्काल आवश्यकता उत्पन्न कर दी है। पारंपरिक डायग्नोस्टिक उपकरण, यद्यपि प्रभावी हैं, परंतु संवेदनशीलता, गति और अनुकूलनशीलता के मामले में अक्सर कमतर सिद्ध होते हैं, विशेष रूप से संसाधन-सीमित परिस्थितियों में। इस परिप्रेक्ष्य में, सरफेस-एन्हैंस्ड रमन स्कैटरिंग (SERS) एक परिवर्तनकारी विश्लेषणात्मक तकनीक के रूप में उभरी है, जो अत्यंत निम्न सांद्रता पर भी आणविक संकेतों का उच्च विशिष्टता और तीव्र परिणाम समय के साथ पता लगाने में सक्षम है। प्रस्तुत शोध प्रबंध में, उन्नत नैनोफैब्रिकेशन, अभिनव सब्सट्रेट इंजीनियरिंग और अत्याधुनिक मशीन लर्निंग एल्गोरिद्म्स को संयोजित करते हुए अगली पीढ़ी के SERS-आधारित प्लेटफॉर्म के व्यापक विकास को प्रस्तुत किया गया है। ये प्लेटफॉर्म बैक्टीरियल, वायरल और परजीवी रोगजनकों की पहचान और विभेदन को लक्षित करते हैं, तथा प्रयोगशाला अनुसंधान और वास्तविक नैदानिक अनुप्रयोगों के बीच की महत्वपूर्ण खाई को पाटने हेतु सक्षम समाधान प्रदान करते हैं।

प्रथम चरण में, हमने एक अभिनव पेपर-आधारित SERS सब्सट्रेट का निर्माण प्रस्तुत किया है, जिसमें ग्लैंसिंग एंगल डिपोज़िशन (GLAD) पद्धति द्वारा साधारण ऑफिस पेपर पर ज़िगज़ैग सिल्वर नैनोरॉड्स (AgNRs) को एकीकृत किया गया। पेपर की छिद्रपूर्ण और तंतुयुक्त संरचना उच्च सतही क्षेत्र और खुरदरापन प्रदान करती है, जो AgNRs की द्विशाखीय ज़िगज़ैग आकृति के साथ मिलकर सघन प्लाज़्मोनिक हॉटस्पॉट्स उत्पन्न करती है, जिससे रमन संकेतों का तीव्र प्रवर्धन होता है। यह सेल्यूलोज़-AgNR हाइब्रिड सब्सट्रेट लचीलापन, बायोडिग्रेडेबिलिटी और कम निर्माण लागत जैसी महत्वपूर्ण

विशेषताएँ प्रदान करता है, जो पारंपरिक कठोर सब्सट्रेट्स की सीमाओं को दूर करता है। इस प्लेटफॉर्म को अस्पताल-संबंधी संक्रमण उत्पन्न करने वाले बैक्टीरिया — *Pseudomonas aeruginosa, Escherichia coli,* और *Staphylococcus aureus* — की पहचान हेतु प्रयोग में लाया गया, जहाँ प्रभावशाली 10^2 copies/mL की लिमिट ऑफ डिटेक्शन (LOD) प्राप्त हुई। उल्लेखनीय रूप से, पेपर-आधारित सब्सट्रेट पर दर्ज SERS तीव्रता पारंपरिक ग्लास-आधारित सब्सट्रेट की तुलना में लगभग दस गुना अधिक थी। इसके अतिरिक्त, ग्राम-पॉज़िटिव और ग्राम-नेगेटिव बैक्टीरिया के बीच स्पष्ट स्पेक्ट्रल विभेदन प्राप्त हुआ, जिससे प्लेटफॉर्म की व्यापक डायग्नोस्टिक क्षमता उजागर होती है।

इसके आधार पर, हमने AgNR-आधारित SERS प्लेटफॉर्म की उपयोगिता को वायरल पहचान की दिशा में विस्तारित किया, विशेष रूप से SARS-CoV-2 वेरिएंट्स और सह-वेरिएंट्स के विभेदन पर केंद्रित होकर। GLAD द्वारा निर्मित शुद्ध AgNR सब्सट्रेट्स का उपयोग *Wild type, Kappa, Delta, Omicron* स्ट्रेन्स तथा *Omicron BA.1, BA.2, BA.5,* और *XBB* सबवेरिएंट्स की संवेदनशील पहचान और स्ट्रेन-स्तरीय विभेदन के लिए किया गया। हालाँकि, इन वेरिएंट्स की अत्यधिक समान आनुवंशिक और बायोकेमिकल प्रोफ़ाइल ने पारंपरिक SERS विश्लेषण के लिए गंभीर चुनौतियाँ प्रस्तुत कीं। इसे पार करने हेतु, मशीन लर्निंग (ML) एल्गोरिद्म्स को SERS डेटा के साथ एकीकृत किया गया ताकि मानव विवेचना से परे सूक्ष्म स्पेक्ट्रल भिन्नताओं को निकाला जा सके। सपोर्ट वेक्टर मशीन (SVM) और बिडायरेक्शनल लॉन्ग शॉर्ट-टर्म मेमोरी (BiLSTM) मॉडलों को 122 पॉज़िटिव नेज़ोफैरिन्जियल स्वैब (NPS) नमूनों से प्राप्त SERS स्पेक्ट्रा पर प्रशिक्षित किया गया, जिनकी पूर्व पुष्टि नेक्स्ट-जनरेशन सीक्वेंसिंग (NGS) द्वारा की गई थी। वेलिडेशन सेट पर SVM क्लासिफ़ायर ने 89% की वर्गीकरण शुद्धता प्राप्त की, जो BiLSTM मॉडल (86%) से अधिक थी। स्वतंत्र ब्लाइंड सेट पर परीक्षण के दौरान, SVM और BiLSTM ने क्रमशः 75% और 70.09% की शुद्धता हासिल की। विशेष रूप से, Omicron

सबवेरिएंट्स के वर्गीकरण में SVM मॉडल ने उल्लेखनीय 96% शुद्धता प्राप्त की। ये परिणाम दर्शाते हैं कि SERS को ML के साथ जोड़ने से वेरिएंट पहचान की संकल्प क्षमता और सटीकता में उल्लेखनीय वृद्धि होती है, जो वास्तविक समय महामारी विज्ञान निगरानी के लिए एक आशाजनक मार्ग प्रस्तुत करती है।

समानांतर रूप से, एंटीमाइक्रोबियल सस्टिबिलिटी टेस्टिंग (AST) के महत्व को ध्यान में रखते हुए, हमने एक अभिनव बाइमेटलिक SERS सब्सट्रेट विकसित किया, जिसमें गोल्ड नैनोआइलैंड्स को सिल्वर नैनोरॉड्स (AuNI@AgNR) पर सजाया गया। यह GLAD और थर्मल डिपोज़िशन तकनीक द्वारा निर्मित किया गया। गोल्ड नैनोआइलैंड्स की उपस्थिति ने न केवल सब्सट्रेट की ऑक्सीकरण प्रतिरोधक स्थिरता बढ़ाई, बल्कि प्लाज़्मोनिक कपलिंग को भी महत्वपूर्ण रूप से उन्नत किया, जिससे विद्युतचुंबकीय क्षेत्र प्रवर्धन अधिक हुआ। AuNI@AgNR सब्सट्रेट ने बैक्टीरियल रोगजनकों का अत्यंत निम्न सांद्रता (1 CFU/mL तक) पर, एकल और मिश्रित बैक्टीरियल कल्चर्स दोनों में, सफल पता लगाना संभव बनाया। इस प्लेटफॉर्म ने ग्राम-पॉज़िटिव और ग्राम-नेगेटिव बैक्टीरिया के बीच स्पष्ट अंतर किया तथा विभिन्न बैक्टीरियल स्ट्रेन्स के न्यूनतम अवरोधक सांद्रता (MICs) का शीघ्र निर्धारण किया। पार्टियल लीस्ट स्क्वेयर डिस्क्रिमिनेंट एनालिसिस (PLS-DA) ने एंटीबायोटिक-संवेदनशील और रेज़िस्टेंट स्ट्रेन्स के बीच स्पष्ट वर्गीकरण को और भी सक्षम बनाया, जिससे AMR प्रोफ़ाइलिंग हेतु प्लेटफॉर्म की उपयोगिता सिद्ध होती है। विशेष रूप से, पॉलीमाइक्रोबियल संक्रमणों में बैक्टीरियल जनसंख्या को अलग करने और निगरानी करने की क्षमता वास्तविक परिस्थितियों में पॉइंट-ऑफ़-केयर (POC) अनुप्रयोगों की दिशा में एक महत्वपूर्ण प्रगति है।

अंततः, परजीवी संक्रमणों के बोझ को संबोधित करने हेतु, हमने मलेरिया की पहचान के लिए एक पोर्टेबल SERS प्लेटफॉर्म विकसित किया, जो हीमोज़ोइन के पैरामैग्नेटिक गुणों का उपयोग करता है — यह एक

अद्वितीय क्रिस्टलीय उपउत्पाद है जो केवल मलेरिया परजीवी द्वारा उत्पन्न होता है। GLAD द्वारा निर्मित AgNR सब्सट्रेट्स का उपयोग करते हुए, रमन मापन के दौरान 0.3 T का बाहरी चुंबकीय क्षेत्र लगाया गया, जिससे SERS सिग्नल की तीव्रता में उल्लेखनीय दस गुना वृद्धि प्राप्त हुई, जो गैर-चुंबकीय परिस्थितियों की तुलना में थी। इस चुंबकीय सहायता ने अभूतपूर्व 10^{-14} M (लगभग 6 परजीवी/μL) की LOD संभव बनाई, जो पारंपरिक सीमाओं से कहीं अधिक है। क्रमिक डायल्यूशन अध्ययनों में प्रदर्शित किया गया कि हीमोग्लोबिन-संबंधित शिखरों के घटने के साथ हीमोज़ोइन संकेत SERS स्पेक्ट्रा में प्रमुख हो गए, जिससे चुंबकीय प्रभाव के तहत हीमोज़ोइन का विद्युतचुंबकीय हॉटस्पॉट्स पर प्राथमिक स्थानीयकरण सत्यापित हुआ। स्वस्थ और मलेरिया-पॉज़िटिव संपूर्ण रक्त और प्लाज़्मा नमूनों के SERS स्पेक्ट्रा पर प्रिंसिपल कंपोनेंट एनालिसिस (PCA) ने स्पष्ट क्लस्टरिंग दर्शाई, जिससे इस विधि की विश्वसनीयता और मज़बूती सिद्ध हुई। विशेष रूप से, चुंबकीय और गैर-चुंबकीय मलेरिया-पॉज़िटिव नमूनों ने PCA स्पेस में अलग-अलग क्षेत्र घेर लिए, जो पहचान की विश्वसनीयता पर चुंबकीय क्षेत्र प्रवर्धन के गहन प्रभाव को उजागर करता है।

संपूर्णतः, यह शोध प्रबंध उन्नत नैनोमैटेरियल्स, SERS तकनीकों और मशीन लर्निंग एल्गोरिद्म्स के एकीकरण की अपार संभावनाओं को प्रदर्शित करता है, जो बैक्टीरियल, वायरल और परजीवी रोगजनकों की पहचान हेतु शक्तिशाली, लचीले और संवेदनशील प्लेटफॉर्म स्थापित कर सकते हैं। विकसित रणनीतियाँ न केवल संवेदनशीलता और विशिष्टता की सीमाओं को आगे बढ़ाती हैं, बल्कि वास्तविक नैदानिक अनुप्रयोगों, महामारी निगरानी और एंटीमाइक्रोबियल प्रबंधन की दिशा में भी मार्ग प्रशस्त करती हैं। भविष्य में, इन प्लेटफॉर्म्स का पूर्ण रूप से एकीकृत पोर्टेबल उपकरणों में रूपांतरण, पहुँच, किफ़ायतीपन और संसाधन-सीमित परिस्थितियों में उपयोगिता को और सुदृढ़ करेगा।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

ABBREVIATIONS

SERS	Surface Enhanced Raman Spectroscopy
AMR	Antimicrobial Resistance
MIC	Minimum Inhibitory Concentration
AST	Antibiotic Susceptibility Test
NGS	Next Generation Sequencing
PCR	Polymerase Chain Reaction
DNA	Deoxyribonucleic Acid
RNA	Ribonucleic Acid
RS	Respiratory Viruses
ELISA	Enzyme Linked Immunosorbent Assay
DOS	Density of states
EM	Electromagnetic enhancement
CE	Chemical enhancement
vdW	van der Waals
XRD	X-ray diffraction
FESEM	Field electron scanning electron microscopy
GLAD	Glancing angle deposition
OAD	Oblique angle deposition
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy
SPR	Surface plasmon resonance
B.E.	Binding energy
PVD	Physical vapor deposition
3D	Three dimensional
EDX	Electron diffraction analysis
EPMA	Electron Probe Microanalyzer
TEM	Transmission electron microscopy

HRTEM	High-resolution transmission electron microscopy
AFM	Atomic force microscopy
TMDC	Transition metal dichalcogenides
PECVD	plasma-enhanced chemical vapor deposition
SERS	Surface enhanced Raman spectroscopy
OC	Oral cancer
ML	Machine Learning
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
MO	Methyl orange
MB	Methylene blue
BPE	trans-1,2-bis(4-pyridyl)ethylene
EC	E. Coli
SA	S. Aureus
RhB	Rhodamine B
BSE	Backscattered electron
CFU	Colony Forming Unit
PVD	Physical vapor deposition
PVA	Polyvinyl alcohol
EDS	Energy dispersive spectrometer
CB	Conduction band
VB	Valance band
SP	Surface potential
KPFM	Kelvin probe force microscopy
CCD	Charge coupled device
LOD	Limit of detection
PBS	Phosphate Buffered Saline