SOLUTION-PROCESSED NEAR-INFRARED (NIR) DETECTORS

Nidhi Dua

Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
May 2025

Solution-processed near-infrared (NIR) detectors

Nidhi Dua

A dissertation submitted in partial fulfilment of conditions for award of the degree of Doctor of Philosophy

Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi

May 2025

Certificate from Advisor

This is to certify that the thesis entitled **Solution-processed near-infrared (NIR) detectors**, being submitted by **Nidhi Dua** to IIT Delhi, is worthy of consideration for the award of the degree of Ph.D. and is a record of the original research work carried out by this student under my supervision. The results contained in this thesis, which may have been previously communicated in the form of manuscripts, conference presentations or patent filings, have not been submitted in part or full, to any other University or Institute for the award of any academic degree.

I certify that this student has pursued the prescribed course of research.

Research Advisor:

Madhusudan Singh

Acknowledgements

I am extremely thankful to my supervisor, Prof. Madhusudan Singh, for his constant support and encouragement during both the tough and rewarding phases of my Ph.D. journey. Working under his mentorship has been beneficial to my professional growth, and I am grateful for the opportunities to learn and develop my skills. I want to thank the chair of my committee, Prof. Bhaskar Mitra, Prof. Abhisek Dixit, and Prof. Samaresh Das for their patience and feedback, and for generously sharing their knowledge and expertise. Furthermore, I must extend my gratitude to the University Grants Commission, UGC for their financial support, which made this research endeavor possible. I must thank the Department of Electrical Engineering staff for assisting me with all of the paperwork for attending international conferences, etc. I would also express my gratitude to the managing staff at CRF and NRF.

I would like to thank my FMDL labmates, Dr. Rajinder Singh Deol for successful fabrication of my devices in University of Ottawa, Canada under supervision of Prof. Ghassan E. Jabbour, and Dr. Nitika Batra for assistance with the mask design and writing. A huge thanks to the postdocs of our lab, Dr. Meenal Mehra, Dr. Soumen Saha, Dr. Sandeep Kumar, Dr. Henam Sylvia Devi, Dr. Md. Samim Hassan for helping me in my synthesis experiments. I am grateful to Mr. Parvez Akhtar for lending me his photodetector, and for generously giving up his valuable time in carrying out painstaking measurements even though he was busy with his own doctoral work. Our mutual discussions helped me come to the conclusions of my work. My other FMDL colleagues, Md. Samim Raza, Mr. Tejveer Anand, were also helpful for offering useful insights in my optical experiments directly or indirectly. I am immensely grateful to Prof. Suddhasatwa Basu (Dept. of Chemical Engineering) and his Ph.D. students for supporting me during the early stages of my PhD when I had no facilities to conduct experiments. I also want to thank Prof. Sameer Sapra (Dept. of Chemistry), Prof. Ravi Shankar (Dept. of Chemistry), Prof. Joby Joseph (Dept. of Physics), and lab assistants, Mr. Virani (MTech Physics Optics Lab), Mr. Vijay (Physics Optics Lab), Ms. Neeru Asija (Optical Communications Electrical lab) for providing access to their tools/ chemicals etc. whenever needed.

Lastly I would be remiss if I didn't mention the role that my family has played throughout this journey – my parents, in-laws, siblings, spouse. Their unwavering belief in me has kept me motivated and uplifted, during every step of this process. I am grateful to God for blessing me with my child, Ruhani, who has brought immense joy to my life.

Abstract

Near-infrared (NIR) detectors using upconversion materials are a promising technology for various applications, including imaging, sensing, and communication. Upconversion materials are typically used to convert longer-wavelength NIR photons into shorter-wavelength visible or ultraviolet photons, which can be easily detected using conventional photodetectors like silicon-based photodiodes. This upconversion process allows for the efficient detection of NIR light, which is otherwise challenging to detect directly with traditional detectors. This process involves the lanthanide-doped crystals or nanoparticles that can absorb multiple low-energy NIR photons and combine their energy to emit a single higher-energy photon in the visible or ultraviolet range. This process is often called anti-Stokes or upconversion luminescence. When NIR light (typically in the range of 700 nm to 1700 nm) is incident on the upconversion material, it is absorbed by the lanthanide dopants. The energy from multiple absorbed NIR photons is combined to promote an electron to a higher energy level.The excited electron eventually relaxes to its ground state by emitting a higher-energy photon in the visible or ultraviolet range. The emitted photon is then detected using a conventional photodetector.

Upconversion Material Synthesis and Analysis: This dissertation focuses on the synthesis of upconversion material, $NaYF_4$:Yb, Er, Gd through thermal decomposition method for retrofitting its thin layer on Si-based detectors. The study establishes the optimal annealing conditions for this important photonic material for potential detectors. The material is synthesized at 320°C to obtain the nearly pure hexagonal phase of the host material as it is known to have 10 times more photoluminescence efficiency than its cubic counterpart. However the study corelates the synthesized thin film with three annealed films (400°C, 500°C, 600°C) for proper analysis of X-ray diffraction, TEM, absorption, PL and its calorimetric shifts etc. Interestingly, with a change in annealing temperature, a calorimetric shift is observed in upconverted emission from green (539 nm) to yellow (655 nm), to red (675 nm). The complete phase transformation from hexagonal to cubic is also seen with morphological changes and commensurate rise in photoluminescence efficiency.

Deposition Methods for Thin Films: The research then shifts to the development of deposition techniques for upconversion materials, leading to the formation of blended thin films that can be integrated with photodetectors.

Measurement and Analysis of Retrofits: In this study, we have presented our findings on the advancement of a process and signal optimized polymer-inorganic hybrid upconversion thin film on glass (UTFG) technology. The objective of this technology is to enhance near-infrared (NIR) detection by utilizing a conventional silicon-based detector. The upconversion nanoparticles (UCNPs) films are tested by stacking the film on commercial Newport (918D-UV-OD3) detector. When compared to a control device made with dielectrically equivalent but upconversion-inert silica nanoparticles, the UCNP device shows a 9.12 % increase in photocurrent. Our measurements of photocurrent showed a 21.16 % increase using a low-cost commercial silicon detector that cost less than five dollars. The materials were tested with a single excitation source, 980 nm in near-infrared, but given the usage of a low-cost detector and a simple glass filter, this platform can be further expanded with adjustments in UCNP chemistry for different wavelengths in the NIR range.

Alongside, silicon-based pin didoes are fabricated using a simplified process with UCNP thin films. We have developed an upconversion detector in which the thin film of a blend of an upconversion material/ polymer on glass is combined with the fabricated silicon-based pin diodes to enhance NIR detection. The marginal cost of upconversion-based silicon detectors in this study is around $\sim$ USD 7 compared to existing infrared detectors costing USD 25. The responsivity of the fabricated pin diodes

is found to be maximum at $\sim$ 980 nm wavelength using multiple light sources starting from ultraviolet emitting LED to near infrared source.

In summary, this dissertation covers the synthesis of upconversion nanoparticles (UCNPs), their characterization, film formation on glass, retrofitting the UCNP layer onto two commercial devices, and the fabrication of pin diodes, along with the optical and electrical results.

सार

अपकन्वर्जन सामग्रियों का उपयोग करने वाले निकट-अवरक्त (NIR) डिटेक्टर इमेजिंग, सेंसिंग और संचार सहित विभिन्न अनुप्रयोगों के लिए एक आशाजनक तकनीक है। अपकन्वर्जन सामग्रियों का उपयोग आम तौर पर लंबी-तरंग दैर्ध्य वाले NIR फोटॉनों को छोटी-तरंग दैर्ध्य वाले दृश्यमान या पराबैंगनी फोटॉनों में बदलने के लिए किया जाता है, जिन्हें सिलिकॉन-आधारित फोटोडायोड जैसे पारंपरिक फोटोडिटेक्टरों का उपयोग करके आसानी से पहचाना जा सकता है। यह अपकन्वर्जन प्रक्रिया NIR प्रकाश का कुशल पता लगाने की अनुमति देती है, जिसे पारंपरिक डिटेक्टरों से सीधे पता लगाना अन्यथा चुनौतीपूर्ण होता है। इस प्रक्रिया में लैंथेनाइड-डोप्ड क्रिस्टल या नैनोकण शामिल होते हैं जो कई कम-ऊर्जा वाले NIR फोटॉनों को अवशोषित कर सकते हैं और अपनी ऊर्जा को मिलाकर दृश्यमान या पराबैंगनी रेंज में एक उच्च-ऊर्जा वाला फोटॉन उत्सर्जित कर सकते हैं। इस प्रक्रिया को अक्सर एंटी-स्टोक्स या अपकन्वर्जन ल्यूमिनेसेंस कहा जाता है। जब NIR प्रकाश (आमतौर पर 700 एनएम से 1700 एनएम की सीमा में) अपकन्वर्जन सामग्री पर पड़ता है, तो इसे लैंथेनाइड डोपेंट द्वारा अवशोषित कर लिया जाता है। कई अवशोषित NIR फोटॉनों से ऊर्जा को एक इलेक्ट्रॉन को उच्च ऊर्जा स्तर पर बढ़ावा देने के लिए संयोजित किया जाता है। उत्तेजित इलेक्ट्रॉन अंततः दृश्यमान या पराबैंगनी रेंज में उच्च-ऊर्जा फोटॉन उत्सर्जित करके अपनी मूल अवस्था में आराम करता है। उत्सर्जित फोटॉन को फिर एक पारंपरिक फोटोडिटेक्टर का उपयोग करके पता लगाया जाता है।

अपकन्वर्जन सामग्री संश्लेषण और विश्लेषण: यह शोध प्रबंध अपकन्वर्जन सामग्री, $NaYF_4$:Yb, Er, Gd के संश्लेषण पर केंद्रित है, जो Si-आधारित डिटेक्टरों पर इसकी पतली परत को फिर से जोड़ने के लिए थर्मल अपघटन विधि के माध्यम से है। अध्ययन संभावित डिटेक्टरों के लिए इस महत्वपूर्ण फोटोनिक सामग्री के लिए इष्टतम एनीलिंग स्थितियों को स्थापित करता है। सामग्री को मेजबान सामग्री के लगभग शुद्ध हेक्सागोनल चरण को प्राप्त करने के लिए 320 C पर संश्लेषित किया जाता है क्योंकि यह अपने क्यूबिक समकक्ष की तुलना में 10 गुना अधिक फोटोल्यूमिनेसेंस दक्षता के लिए जाना जाता है। हालांकि अध्ययन ने एक्स-रे विवर्तन, टीईएम, अवशोषण, पीएल और इसके कैलोरीमेट्रिक शिफ्ट आदि के उचित विश्लेषण के लिए संश्लेषित पतली फिल्म को तीन एनील्ड फिल्मों (400 डिग्री सेल्सियस, 500 डिग्री सेल्सियस, 600 डिग्री सेल्सियस) के साथ सहसंबंधित किया है। दिलचस्प बात यह है कि एनीलिंग तापमान में बदलाव के साथ, हरे (539 एनएम) से पीले (655 एनएम), लाल (675 एनएम) तक अपकन्वर्टेड उत्सर्जन में कैलोरीमेट्रिक शिफ्ट देखी जाती है। हेक्सागोनल से क्यूबिक में पूर्ण चरण परिवर्तन भी रूपात्मक परिवर्तनों और फोटोल्यूमिनेसेंस दक्षता में समान वृद्धि के साथ देखा जाता है।

पतली फिल्मों के लिए जमाव विधियाँ: फिर अनुसंधान अपकन्वर्जन सामग्री के लिए जमाव तकनीकों के विकास की ओर बढ़ता है, जिससे मिश्रित पतली फिल्मों का निर्माण होता है जिन्हें फोटोडिटेक्टर के साथ एकीकृत किया जा सकता है।

रेट्रोफिट का मापन और विश्लेषण: इस अध्ययन में, हमने प्रक्रिया और संकेत अनुकूलित पॉलिमर-अकार्बनिक हाइब्रिड अपकन्वर्जन थिन फिल्म ऑन ग्लास (UTFG) तकनीक की उन्नति पर अपने निष्कर्ष प्रस्तुत किए हैं। इस तकनीक का उद्देश्य पारंपरिक सिलिकॉन-आधारित डिटेक्टर का उपयोग करके निकट-अवरक्त (NIR) पहचान को बढ़ाना है। अपकन्वर्जन नैनोपार्टिकल्स (UCNPs) फिल्मों का परीक्षण कमर्शियल न्यूपोर्ट (918D-UV-OD3) डिटेक्टर पर फिल्म को स्टैक करके किया जाता है। जब डाइइलेक्ट्रिकली समतुल्य लेकिन अपकन्वर्जन-निष्क्रिय सिलिका नैनोपार्टिकल्स से बने कंट्रोल डिवाइस से तुलना की जाती है, तो UCNP डिवाइस फोटोकरंट में 9.12 % की वृद्धि दिखाती है। फोटोकरंट के हमारे माप ने कम लागत वाले कमर्शियल सिलिकॉन डिटेक्टर का उपयोग करके 21.16 % की वृद्धि दिखाई, जिसकी कीमत पाँच डॉलर से कम थी। सामग्रियों का परीक्षण एक एकल उत्तेजना स्रोत, निकट-अवरक्त में 980 एनएम के साथ किया गया था, लेकिन कम लागत वाले डिटेक्टर और एक साधारण ग्लास फ़िल्टर के उपयोग को देखते हुए, इस प्लेटफ़ॉर्म को NIR रेंज में विभिन्न तरंग दैर्ध्य के लिए UCNP रसायन विज्ञान में समायोजन के साथ आगे बढ़ाया जा सकता है।

साथ ही, सिलिकॉन-आधारित पिन डायोड को UCNP पतली फिल्मों के साथ एक सरलीकृत प्रक्रिया का उपयोग करके तैयार किया जाता है। हमने एक अपकन्वर्जन डिटेक्टर विकसित किया है जिसमें ग्लास पर अप-

कन्वर्जन सामग्री/पॉलिमर के मिश्रण की पतली फिल्म को NIR डिटेक्शन को बढ़ाने के लिए निर्मित सिलिकॉन-आधारित पिन डायोड के साथ जोड़ा जाता है। इस अध्ययन में अपकन्वर्जन-आधारित सिलिकॉन डिटेक्टरों की सीमांत लागत मौजूदा अवरक्त डिटेक्टरों की लागत 25 अमेरिकी डॉलर की तुलना में लगभग $\sim$ USD 7 है। निर्मित पिन डायोड की प्रतिक्रियाशीलता पराबैंगनी उत्सर्जक एलईडी से लेकर निकट अवरक्त स्रोत तक कई प्रकाश स्रोतों का उपयोग करके $\sim$ 980 एनएम तरंग दैर्ध्य पर अधिकतम पाई गई है।

ਸਾਰ

ਅੱਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਸਮੱਗਰੀ ਦੀ ਵਰਤੋਂ ਕਰਨ ਵਾਲੇ ਨਿਅਰ-ਇਨਫਰਾਰੈੱਡ (NIR) ਡਿਟੈਕਟਰ ਇਮੇਜਿੰਗ, ਸੈਂਸਿੰਗ ਅਤੇ ਸੰਚਾਰ ਸਮੇਤ ਵੱਖ-ਵੱਖ ਐਪਲੀਕੇਸ਼ਨਾਂ ਲਈ ਇੱਕ ਵਾਅਦਾ ਕਰਨ ਵਾਲੀ ਤਕਨਾਲੋਜੀ ਹਨ। ਅੱਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਸਮੱਗਰੀ ਆਮ ਤੌਰ ’ਤੇ ਲੰਬੀ-ਵੇਵਲ-ਲੰਬਾਈ ਵਾਲੇ NIR ਫੋਟੌਨਾਂ ਨੂੰ ਛੋਟੀ-ਵੇਵਲ-ਲੰਬਾਈ ਵਾਲੇ ਦ੍ਰਿਸ਼ਮਾਨ ਜਾਂ ਅਲਟਰਾਵਾਇਲਟ ਫੋਟੌਨਾਂ ਵਿੱਚ ਬਦਲਣ ਲਈ ਵਰਤੀ ਜਾਂਦੀ ਹੈ, ਜਿਸਨੂੰ ਸਿਲੀਕਾਨ-ਅਧਾਰਿਤ ਫੋਟੋਡਾਇਓਡ ਵਰਗੇ ਰਵਾਇਤੀ ਫੋਟੋਡਿਟੈਕਟਰਾਂ ਦੀ ਵਰਤੋਂ ਕਰਕੇ ਆਸਾਨੀ ਨਾਲ ਖੋਜਿਆ ਜਾ ਸਕਦਾ ਹੈ। ਇਹ ਅੱਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਪ੍ਰਕਿਰਿਆ NIR ਰੋਸ਼ਨੀ ਦੀ ਕੁਸ਼ਲ ਖੋਜ ਦੀ ਆਗਿਆ ਦਿੰਦੀ ਹੈ, ਜਿਸਦਾ ਸਿੱਧਾ ਪਤਾ ਲਗਾਉਣਾ ਰਵਾਇਤੀ ਡਿਟੈਕਟਰਾਂ ਨਾਲ ਚੁਣੌਤੀਪੂਰਨ ਹੁੰਦਾ ਹੈ। ਇਸ ਪ੍ਰਕਿਰਿਆ ਵਿੱਚ ਲੈਂਥਾਨਾਈਡ-ਡੋਪਡ ਕ੍ਰਿਸਟਲ ਜਾਂ ਨੈਨੋਪਾਰਟਿਕਲ ਸ਼ਾਮਲ ਹੁੰਦੇ ਹਨ ਜੋ ਕਈ ਘੱਟ-ਊਰਜਾ ਵਾਲੇ NIR ਫੋਟੌਨਾਂ ਨੂੰ ਸੋਖ ਸਕਦੇ ਹਨ ਅਤੇ ਦ੍ਰਿਸ਼ਮਾਨ ਜਾਂ ਅਲਟਰਾਵਾਇਲਟ ਰੇਂਜ ਵਿੱਚ ਇੱਕ ਸਿੰਗਲ ਉੱਚ-ਊਰਜਾ ਵਾਲੇ ਫੋਟੋਨ ਨੂੰ ਛੱਡਣ ਲਈ ਆਪਣੀ ਊਰਜਾ ਨੂੰ ਜੋੜ ਸਕਦੇ ਹਨ। ਇਸ ਪ੍ਰਕਿਰਿਆ ਨੂੰ ਅਕਸਰ ਐਂਟੀ-ਸਟੋਕਸ ਜਾਂ ਅੱਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਲੂਮੀਨੇਸੈਂਸ ਕਿਹਾ ਜਾਂਦਾ ਹੈ। ਜਦੋਂ NIR ਰੋਸ਼ਨੀ (ਆਮ ਤੌਰ ’ਤੇ 700 nm ਤੋਂ 1700 nm ਦੀ ਰੇਂਜ ਵਿੱਚ) ਅੱਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਸਮੱਗਰੀ ’ਤੇ ਵਾਪਰਦੀ ਹੈ, ਤਾਂ ਇਹ ਲੈਂਥਾਨਾਈਡ ਡੋਪੈਂਟਾਂ ਦੁਆਰਾ ਸੋਖ ਲਈ ਜਾਂਦੀ ਹੈ। ਕਈ ਸੋਖੇ ਗਏ NIR ਫੋਟੌਨਾਂ ਤੋਂ ਪ੍ਰਾਪਤ ਊਰਜਾ ਨੂੰ ਇੱਕ ਇਲੈਕਟ੍ਰੌਨ ਨੂੰ ਉੱਚ ਊਰਜਾ ਪੱਧਰ ’ਤੇ ਉਤਸ਼ਾਹਿਤ ਕਰਨ ਲਈ ਜੋੜਿਆ ਜਾਂਦਾ ਹੈ। ਉਤਸ਼ਾਹਿਤ ਇਲੈਕਟ੍ਰੌਨ ਅੰਤ ਵਿੱਚ ਦ੍ਰਿਸ਼ਮਾਨ ਜਾਂ ਅਲਟਰਾਵਾਇਲਟ ਰੇਂਜ ਵਿੱਚ ਇੱਕ ਉੱਚ-ਊਰਜਾ ਵਾਲੇ ਫੋਟੋਨ ਨੂੰ ਛੱਡ ਕੇ ਆਪਣੀ ਜ਼ਮੀਨੀ ਅਵਸਥਾ ਵਿੱਚ ਆਰਾਮ ਕਰਦਾ ਹੈ। ਫਿਰ ਇੱਕ ਰਵਾਇਤੀ ਫੋਟੋਡਿਟੈਕਟਰ ਦੀ ਵਰਤੋਂ ਕਰਕੇ ਉਤਸਰਜਿਤ ਫੋਟੋਨ ਦਾ ਪਤਾ ਲਗਾਇਆ ਜਾਂਦਾ ਹੈ।

ਇਹ ਖੋਜ-ਪ੍ਰਬੰਧ Si-ਅਧਾਰਿਤ ਡਿਟੈਕਟਰਾਂ ’ਤੇ ਇਸਦੀ ਪਤਲੀ ਪਰਤ ਨੂੰ ਰੀਟ੍ਰੋਫਿਟ ਕਰਨ ਲਈ ਥਰਮਲ ਸੜਨ ਵਿਧੀ ਰਾਹੀਂ ਅਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਸਮੱਗਰੀ, $NaYF_4$:Yb, Er, Gd ਦੇ ਸੰਸਲੇਸ਼ਣ ’ਤੇ ਕੇਂਦ੍ਰਤ ਕਰਦਾ ਹੈ। ਅਧਿਐਨ ਸੰਭਾਵੀ ਡਿਟੈਕਟਰਾਂ ਲਈ ਇਸ ਮਹੱਤਵਪੂਰਨ ਫੋਟੋਨਿਕ ਸਮੱਗਰੀ ਲਈ ਅਨੁਕੂਲ ਐਨੀਲਿੰਗ ਸਥਿਤੀਆਂ ਸਥਾਪਤ ਕਰਦਾ ਹੈ। ਹੋਸਟ ਸਮੱਗਰੀ ਦੇ ਲਗਭਗ ਸ਼ੁੱਧ ਹੈਕਸਾਗੋਨਲ ਪੜਾਅ ਨੂੰ ਪ੍ਰਾਪਤ ਕਰਨ ਲਈ ਸਮੱਗਰੀ ਨੂੰ 320 ਡਿਗਰੀ ਸੈਲਸੀਅਸ ’ਤੇ ਸੰਸ਼ਲੇਸ਼ਿਤ ਕੀਤਾ ਜਾਂਦਾ ਹੈ ਕਿਉਂਕਿ ਇਸਨੂੰ ਇਸਦੇ ਘਣ ਹਮਰੁਤਬਾ ਨਾਲੋਂ 10 ਗੁਣਾ ਜ਼ਿਆਦਾ ਫੋਟੋਲੂਮਿਨੇਸੈਂਸ ਕੁਸ਼ਲਤਾ ਲਈ ਜਾਣਿਆ ਜਾਂਦਾ ਹੈ। ਹਾਲਾਂਕਿ, ਅਧਿਐਨ ਐਕਸ-ਰੇ ਵਿਭਿੰਨਤਾ, TEM, ਸੋਖਣ, PL ਅਤੇ ਇਸਦੇ ਕੈਲੋਰੀਮੈਟ੍ਰਿਕ ਸ਼ਿਫਟਾਂ ਆਦਿ ਦੇ ਸਹੀ ਵਿਸ਼ਲੇਸ਼ਣ ਲਈ ਤਿੰਨ ਐਨੀਲਡ ਫਿਲਮਾਂ (400 ਡਿਗਰੀ ਸੈਲਸੀਅਸ, 500 ਡਿਗਰੀ ਸੈਲਸੀਅਸ, 600 ਡਿਗਰੀ ਸੈਲਸੀਅਸ) ਨਾਲ ਸਿੰਥੇਸਾਈਜ਼ਡ ਪਤਲੀ ਫਿਲਮ ਨੂੰ ਕੋਰਲੇਟ ਕਰਦਾ ਹੈ। ਦਿਲਚਸਪ ਗੱਲ ਇਹ ਹੈ ਕਿ ਐਨੀਲਿੰਗ ਤਾਪਮਾਨ ਵਿੱਚ ਤਬਦੀਲੀ ਦੇ ਨਾਲ, ਹਰੇ (539 nm) ਤੋਂ ਪੀਲੇ (655 nm), ਲਾਲ (675 nm) ਵਿੱਚ ਅਪਕਨਵਰਟਡ ਨਿਕਾਸ ਵਿੱਚ ਇੱਕ ਕੈਲੋਰੀਮੈਟ੍ਰਿਕ ਸ਼ਿਫਟ ਦੇਖਿਆ ਜਾਂਦਾ ਹੈ। ਹੈਕਸਾਗੋਨਲ ਤੋਂ ਕਿਊਬਿਕ ਵਿੱਚ ਪੂਰਾ ਪੜਾਅ ਪਰਿਵਰਤਨ ਰੂਪ ਵਿਗਿਆਨਿਕ ਤਬਦੀਲੀਆਂ ਅਤੇ ਫੋਟੋਲੂਮਿਨਿਸੈਂਸ ਕੁਸ਼ਲਤਾ ਵਿੱਚ ਅਨੁਪਾਤਕ ਵਾਧੇ ਦੇ ਨਾਲ ਵੀ ਦੇਖਿਆ ਜਾਂਦਾ ਹੈ।

ਪਤਲੀਆਂ ਫਿਲਮਾਂ ਲਈ ਜਮ੍ਹਾ ਕਰਨ ਦੇ ਤਰੀਕੇ: ਖੋਜ ਫਿਰ ਅਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਸਮੱਗਰੀ ਲਈ ਜਮ੍ਹਾ ਕਰਨ ਦੀਆਂ ਤਕਨੀਕਾਂ ਦੇ ਵਿਕਾਸ ਵੱਲ ਬਦਲਦੀ ਹੈ, ਜਿਸ ਨਾਲ ਮਿਸ਼ਰਤ ਪਤਲੀਆਂ ਫਿਲਮਾਂ ਦਾ ਗਠਨ ਹੁੰਦਾ ਹੈ ਜਿਨ੍ਹਾਂ ਨੂੰ ਫੋਟੋਡਿਟੈਕਟਰਾਂ ਨਾਲ ਜੋੜਿਆ ਜਾ ਸਕਦਾ ਹੈ।

ਰੀਟਰੋਫਿਟਸ ਦਾ ਮਾਪ ਅਤੇ ਵਿਸ਼ਲੇਸ਼ਣ: ਇਸ ਅਧਿਐਨ ਵਿੱਚ, ਅਸੀਂ ਇੱਕ ਪ੍ਰਕਿਰਿਆ ਅਤੇ ਸਿਗਨਲ ਅਨੁਕੂਲਿਤ ਪੋਲੀਮਰ-ਇਨਆਰਗੈਨਿਕ ਹਾਈਬ੍ਰਿਡ ਅਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਥਿਨ ਫਿਲਮ ਆਨ ਗਲਾਸ (UTFG) ਤਕਨਾਲੋਜੀ ਦੀ ਤਰੱਕੀ ’ਤੇ ਆਪਣੇ ਨਤੀਜੇ ਪੇਸ਼ ਕੀਤੇ ਹਨ। ਇਸ ਤਕਨਾਲੋਜੀ ਦਾ ਉਦੇਸ਼ ਇੱਕ ਰਵਾਇਤੀ ਸਿਲੀਕਾਨ-ਅਧਾਰਿਤ ਡਿਟੈਕਟਰ ਦੀ ਵਰਤੋਂ ਕਰਕੇ ਨੇੜੇ-ਇਨਫਰਾਰੈੱਡ (NIR) ਖੋਜ ਨੂੰ ਵਧਾਉਣਾ ਹੈ। ਅਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਨੈਨੋਪਾਰਟਿਕਲ (UCNPs) ਫਿਲਮਾਂ ਦੀ ਜਾਂਚ ਫਿਲਮ ਨੂੰ ਵਪਾਰਕ ਨਿਊਪੋਰਟ (918D-UV-OD3) ਡਿਟੈਕਟਰ ’ਤੇ ਸਟੈਕ ਕਰਕੇ ਕੀਤੀ ਜਾਂਦੀ ਹੈ। ਜਦੋਂ ਡਾਇਲੈਕਟ੍ਰਿਕ ਤੌਰ ’ਤੇ ਬਰਾਬਰ ਪਰ ਅਪਕਨਵਰਜ਼ਨ-ਇਨਰਟ ਸਿਲਿਕਾ ਨੈਨੋਪਾਰਟਿਕਲ ਨਾਲ ਬਣੇ ਕੰਟਰੋਲ ਡਿਵਾਈਸ ਨਾਲ ਤੁਲਨਾ ਕੀਤੀ ਜਾਂਦੀ ਹੈ, ਤਾਂ UCNP ਡਿਵਾਈਸ ਫੋਟੋਕਰੰਟ ਵਿੱਚ 9.12% ਵਾਧਾ ਦਿਖਾਉਂਦੀ ਹੈ। ਫੋਟੋਕਰੰਟ ਦੇ ਸਾਡੇ ਮਾਪਾਂ ਨੇ ਘੱਟ-ਲਾਗਤ ਵਾਲੇ ਵਪਾਰਕ ਸਿਲੀਕਾਨ ਡਿਟੈਕਟਰ ਦੀ ਵਰਤੋਂ ਕਰਕੇ 21.16% ਵਾਧਾ ਦਿਖਾਇਆ ਜਿਸਦੀ ਕੀਮਤ ਪੰਜ ਡਾਲਰ ਤੋਂ ਘੱਟ ਹੈ। ਸਮੱਗਰੀ ਦੀ ਜਾਂਚ ਇੱਕ ਸਿੰਗਲ ਐਕਸਾਈਟੇਸ਼ਨ ਸਰੋਤ, ਨੇੜੇ-ਇਨਫਰਾਰੈੱਡ ਵਿੱਚ 980 nm ਨਾਲ ਕੀਤੀ ਗਈ ਸੀ, ਪਰ ਇੱਕ ਘੱਟ-ਲਾਗਤ ਵਾਲੇ ਡਿਟੈਕਟਰ ਅਤੇ ਇੱਕ ਸਧਾਰਨ ਸ਼ੀਸ਼ੇ ਦੇ ਫਿਲਟਰ ਦੀ ਵਰਤੋਂ ਨੂੰ ਦੇਖਦੇ ਹੋਏ, ਇਸ ਪਲੇਟਫਾਰਮ ਨੂੰ NIR ਰੇਂਜ ਵਿੱਚ ਵੱਖ-ਵੱਖ ਤਰੰਗ-ਲੰਬਾਈ ਲਈ UCNP ਰਸਾਇਣ ਵਿਗਿਆਨ ਵਿੱਚ ਸਮਾਯੋਜਨ ਨਾਲ ਹੋਰ ਵਧਾਇਆ

ਜਾ ਸਕਦਾ ਹੈ।

ਇਸ ਦੇ ਨਾਲ, ਸਿਲੀਕਾਨ-ਅਧਾਰਿਤ ਪਿੰਨ ਡੀਡੋਜ਼ ਨੂੰ UCNP ਪਤਲੀਆਂ ਫਿਲਮਾਂ ਨਾਲ ਇੱਕ ਸਰਲ ਪ੍ਰਕਿਰਿਆ ਦੀ ਵਰਤੋਂ ਕਰਕੇ ਬਣਾਇਆ ਜਾਂਦਾ ਹੈ। ਅਸੀਂ ਇੱਕ ਅਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਡਿਟੈਕਟਰ ਵਿਕਸਤ ਕੀਤਾ ਹੈ ਜਿਸ ਵਿੱਚ ਸ਼ੀਸ਼ੇ 'ਤੇ ਇੱਕ ਅਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਸਮੱਗਰੀ/ਪੋਲੀਮਰ ਦੇ ਮਿਸ਼ਰਣ ਦੀ ਪਤਲੀ ਫਿਲਮ ਨੂੰ NIR ਖੋਜ ਨੂੰ ਵਧਾਉਣ ਲਈ ਫੈਬਰੀਕੇਟਿਡ ਸਿਲੀਕਾਨ-ਅਧਾਰਿਤ ਪਿੰਨ ਡਾਇਓਡਸ ਨਾਲ ਜੋੜਿਆ ਜਾਂਦਾ ਹੈ। ਇਸ ਅਧਿਐਨ ਵਿੱਚ ਅਪਕਨਵਰਜ਼ਨ-ਅਧਾਰਿਤ ਸਿਲੀਕਾਨ ਡਿਟੈਕਟਰਾਂ ਦੀ ਸੀਮਾਂਤ ਲਾਗਤ ਮੌਜੂਦਾ ਇਨਫਰਾਰੈੱਡ ਡਿਟੈਕਟਰਾਂ ਦੇ ਮੁਕਾਬਲੇ ਲਗਭਗ $\sim$ USD 7 ਹੈ ਜਿਨ੍ਹਾਂ ਦੀ ਕੀਮਤ USD 25 ਹੈ। ਫੈਬਰੀਕੇਟਿਡ ਪਿੰਨ ਡਾਇਓਡਸ ਦੀ ਜ਼ਿੰਮੇਵਾਰੀ ਅਲਟਰਾਵਾਇਲਟ ਐਮੀਟਿੰਗ LED ਤੋਂ ਲੈ ਕੇ ਨੇੜੇ ਇਨਫਰਾਰੈੱਡ ਸਰੋਤ ਤੱਕ ਕਈ ਪ੍ਰਕਾਸ਼ ਸਰੋਤਾਂ ਦੀ ਵਰਤੋਂ ਕਰਦੇ ਹੋਏ $\sim$ 980 nm ਤਰੰਗ-ਲੰਬਾਈ 'ਤੇ ਵੱਧ ਤੋਂ ਵੱਧ ਪਾਈ ਗਈ ਹੈ।

ਸੰਖੇਪ ਵਿੱਚ, ਇਹ ਖੋਜ ਨਿਬੰਧ ਅੱਪਕਨਵਰਜ਼ਨ ਨੈਨੋਪਾਰਟਿਕਲ (UCNPs) ਦੇ ਸੰਸਲੇਸ਼ਣ, ਉਨ੍ਹਾਂ ਦੀ ਵਿਸ਼ੇਸ਼ਤਾ, ਸ਼ੀਸ਼ੇ 'ਤੇ ਫਿਲਮ ਨਿਰਮਾਣ, UCNP ਪਰਤ ਨੂੰ ਦੋ ਵਪਾਰਕ ਡਿਵਾਈਸਾਂ 'ਤੇ ਰੀਟਰੋਫਿਟਿੰਗ, ਅਤੇ ਆਪਟੀਕਲ ਅਤੇ ਇਲੈਕਟ੍ਰੀਕਲ ਨਤੀਜਿਆਂ ਦੇ ਨਾਲ ਪਿੰਨ ਡਾਇਓਡਸ ਦੇ ਨਿਰਮਾਣ ਨੂੰ ਕਵਰ ਕਰਦਾ ਹੈ।

Contents

List of Figures

List of Tables