खंड २, अंक १, फरवरी –२०२६
ई–विज्ञानम
मासिक विज्ञान पत्रिका

Vol. 2, Issue 1, February-2026
e-vigyanam
Monthly Science Journal

सामान्य आलेख (General Article)

DOI: 10.66346/ev.v2i1.2026.7

संवेदन अनुप्रयोग हेतु हाइड्रोथर्मल तकनीक से कार्बन क्वांटम डॉट्स का संश्लेषण

प्रज्ञा पटेल*, आदित्य श्रीवास्तव, शमशाद अहमद खान
भौतिक विभाग, सेंट एंड्रयूज कॉलेज सिविल लाइन, गोरखपुर, उत्तर प्रदेश, भारत-२७३००१
लेखक से संवाद के लिए ईमेल*- pragyapatel815@gmail.com

आलेख प्राप्त: २० फ़रवरी २०२६; अंतिम संशोधन ०६ अप्रैल २०२६; स्वीकृत: १३ अप्रैल २०२६
प्रथम ऑनलाइन प्रकाशित: २८ अप्रैल २०२६

सारांश

वर्तमान अध्ययन में, हमने प्राकृतिक कार्बन स्रोत के रूप में 0**D** कार्बन क्वांटम डॉट्स के निर्माण के लिए सौंफ के बीज के पाउडर का उपयोग किया है। कार्बन क्वांटम डॉट्स का सरल, पर्यावरण-अनुकूल संश्लेषण एक-चरणीय हाइड्रोथर्मल विधि द्वारा किया गया है। इसके अलावा, संश्लेषित कार्बन क्वांटम डॉट्स का संरचनात्मक और आकारिकीय विश्लेषण HRXRD और HRTEM के उपयोग से किया गया है। HRXRD विश्लेषण से अनाकार ग्रेफाइट प्रोफाइल का पता चलता है, और HRTEM ने असमान गोलाकार आकारिकी और 10 nm से कम आकार के डॉट्स की उपस्थिति की पुष्टि होती है। UV-VIS स्पेक्ट्रोस्कोपी माप कार्बन-कार्बन द्वि-आबंध और कार्बोनिल समूह के अनुरूप π-π^* और n-π^* संक्रमणों को दर्शाता है। क्वांटम परिरोध प्रभाव के कारण, प्रकाश संदीप्ति स्पेक्ट्रा संश्लेषित कार्बन क्वांटम डॉट्स के दृश्य क्षेत्र में उत्तेजना-निर्भर उत्सर्जक व्यवहार को प्रकट करते हैं। इस अध्ययन में, अन्य भारी धातु आयनों की तुलना में, Ag^+ ने कार्बन क्वांटम डॉट्स के प्रकाश संदीप्ति शमन को काफी अधिक मजबूती से प्रदर्शित किया, जिसकी पहचान सीमा १० माइक्रो मोलर थी। यह संश्लेषित कार्बन क्वांटम डॉट्स की एक संवेदनशील Ag^+ संवेदन यंत्र के रूप में प्रभावी उपयोगिता को दर्शाता है।

मुख्य शब्द: कार्बन क्वांटम डॉट्स, प्रेषण इलेक्ट्रॉन सूक्ष्मदर्शी,UV-Vis स्पेक्ट्रोस्कोपी, प्रकाश संदीप्ति, संवेदक

खंड २, अंक १, फरवरी –२०२६
ई–विज्ञानम
मासिक विज्ञान पत्रिका

Vol. 2, Issue 1, February-2026
e-vigyanam
Monthly Science Journal

सामान्य आलेख (General Article)

DOI: 10.66346/ev.v2i1.2026.7

Synthesis of Carbon Quantum Dots via Hydrothermal Technique for Sensing Applications

Pragya Patel*, Aditya Srivastava, Shamshad Ahmed Khan
Department of Physics, St. Andrew's College, Civil Line, Gorakhpur, Uttar Pradesh, India-273001
Corresponding author Email*: pragyapatel815@gmail.com

Received on: 20 February 2026; Final Revision: 09 April 2026; Accepted: 13 April 2026
Published Online First on: 28 April 2026

ABSTRACT

In the present investigation, fennel seed powder was employed as a sustainable natural precursor for the synthesis of zero-dimensional carbon quantum dots. Carbon quantum dots were synthesized via a facile and environmentally benign one-step hydrothermal approach. Comprehensive structural and morphological characterizations were performed using High-Resolution X-Ray Diffraction (HRXRD) and High Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM). The HRXRD results revealed an amorphous graphitic nature, while HRTEM images confirmed the formation of quasi-spherical carbon quantum dots with non-uniform morphology and particle sizes below 10 nm. UV–Visible absorption spectra displayed characteristic π–π^* and n–π^* electronic transitions, attributed to C=C and C=O functional groups, respectively. Photoluminescence (PL) analysis demonstrated excitation-dependent emission behaviour in the visible region, arising from the quantum confinement effect. Notably, among various tested heavy metal ions, Ag^+ ions induced pronounced photoluminescence quenching of the carbon quantum dots, achieving a detection limit of 10 µM. These findings highlight the promising potential of the synthesized carbon quantum dots as an efficient and sensitive fluorescent probe for Ag^+ ion detection.

Keywords: Carbon quantum dots, HRXRD, FESEM, Photoluminescence

1. प्रस्तावना

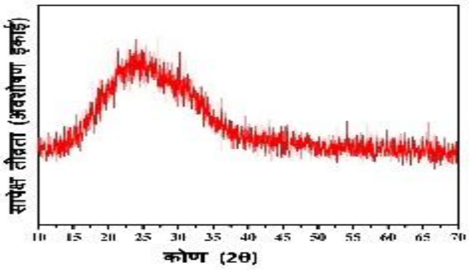
मेसोस्कोपिक जगत में 'सेमीकंडक्टर नैनोक्रिस्टल' शब्द को अक्सर क्वांटम डॉट्स के रूप में जाना जाता है, जो गोलाकार और वृत्ताकार आकृति वाले नैनोस्केल सेमीकंडक्टर होते हैं। [1] कार्बन क्वांटम डॉट्स शून्य-आयामी कार्बन-आधारित नैनोमटेरियल का नया रूप हैं जो प्रबल उत्तेजना-निर्भर फोटोल्यूमिनेसेंस के लिए उल्लेखनीय हैं। अपनी खोज के बाद से, कार्बन क्वांटम डॉट्स ने जीव विज्ञान, संवेदन, नैनो विज्ञान और फोटो इलेक्ट्रोलिसिस के क्षेत्र में शोधकर्ताओं की रुचि जगाई है, और उनके संश्लेषण और अनुप्रयोगों में महत्वपूर्ण प्रगति हुई है। [2] ये नैनोकण या तो ग्रेफाइट क्रिस्टलीय (sp^2) या अनाकार (मिश्रित sp^2/sp^3) कार्बन कोर और एक स्व-निष्क्रिय आवरण से बने होते हैं, जिसमें हाइड्रॉक्सिल, एमीन और कार्बोक्सिलेट जैसे कई कार्यात्मक समूह शामिल किए जा सकते हैं। [3] कार्बन क्वांटम डॉट्स पारंपरिक अर्धचालक क्वांटम डॉट्स के वांछनीय प्रकाशीय गुणों को कई कमियों, जैसे कि कोशिका विषाक्तता और पर्यावरणीय खतरों, को दूर करते हुए संयोजित करते हैं। इसके अतिरिक्त, वे अच्छी जल घुलनशीलता, रासायनिक स्थिरता, प्रकाश-विरंजन के प्रति प्रतिरोध और बड़े पैमाने पर उत्पादन के लिए व्यवहार्य आसान सतह कार्यात्मकता प्रदर्शित करते हैं।

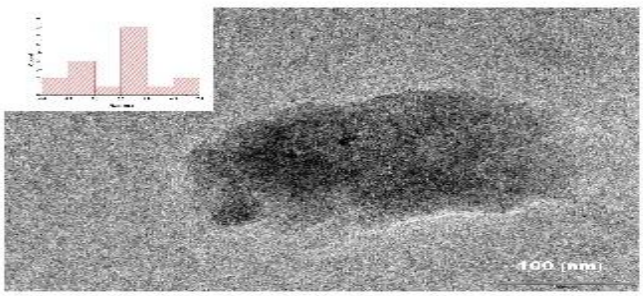
सिल्वर (Ag^+) एक व्यापक और खतरनाक प्रदूषक है जो जलीय पारिस्थितिकी तंत्र और मानव स्वास्थ्य के लिए गंभीर जोखिम पैदा करता है। इसलिए, Ag^+ का सटीक पता लगाना एक महत्वपूर्ण प्राथमिकता है, और इस उद्देश्य के लिए कई विश्लेषणात्मक विधियाँ विकसित की गई हैं। हालांकि, कई मौजूदा तकनीकें महंगी, समय लेने वाली, लागू करने में जटिल या पर्याप्त संवेदनशीलता की कमी वाली हैं। परिणामस्वरूप, इन सीमाओं को दूर करने के लिए नए संवेदन विकल्पों और अनुकूलित प्रकाश संदीप्त संवेदन यंत्रों पर काम किया जा रहा है।

हालांकि धातु आयन संवेदन के लिए कई जैव-आधारित कार्बन क्वांटम डॉट्स की रिपोर्ट की गई है, फिर भी बेहतर प्रतिदीप्ति गुणों और संवेदन दक्षता वाले नए टिकाऊ तथा सुलभ प्रारंभिक पदार्थों की खोज अनुसंधान का एक प्रमुख क्षेत्र बना हुआ है। इस संदर्भ में, सौंफ के बीज का पाउडर एक आसानी से उपलब्ध घरेलू और नवीकरणीय जैव-मास संसाधन है जो कार्बन और ऑक्सीजन से भरपूर है, और कार्बन क्वांटम डॉट्स के लिए एक प्रभावी स्रोत के रूप में कार्य कर सकता है। वर्तमान कार्य में, सौंफ के बीज से प्राप्त कार्बन क्वांटम डॉट्स को एक सरल एक-चरणीय हाइड्रोथर्मल विधि द्वारा संश्लेषित किया गया है। इसके अलावा, तैयार किए गए कार्बन क्वांटम डॉट्स, Ag^+ की अत्यधिक संवेदनशील और चयनात्मक पहचान प्रदर्शित करते हैं, जो पर्यावरण निगरानी के लिए कुशल ऑप्टिकल नैनोप्रोब्स के रूप में उनकी क्षमता को उजागर करते हैं।

2. विवेचना

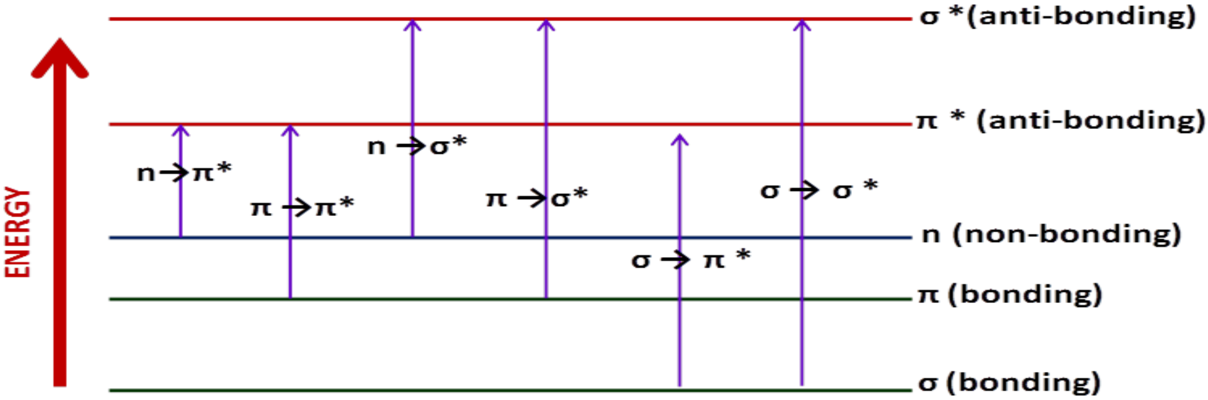
सौंफ के बीज के पाउडर को कार्बन स्रोत के रूप में उपयोग करके कार्बन क्वांटम डॉट्स का संश्लेषण किया गया है। कार्बन क्वांटम डॉट्स के संश्लेषण के लिए पर्यावरण के अनुकूल हाइड्रोथर्मल उपचार विधि का प्रयोग किया गया। संक्षेप में, 0.5 ग्राम सौंफ के बीज के पाउडर को 30 मिलीलीटर अतिशुद्ध जल में मिलाया गया और 30 मिनट तक अल्ट्रासोनिकेट किया गया। परिणामी सस्पेंशन को 60 मिलीलीटर टेफ्लॉन-लाइन वाले हाइड्रोथर्मल रिएक्टर में डाला गया, जिसे एक प्रोग्रामेबल मफल भट्टी में रखा गया और 180 डिग्री सेल्सियस पर 3.5 घंटे तक गर्म किया गया। रिएक्टर को कमरे के तापमान तक स्वाभाविक रूप से ठंडा होने देने के बाद, हमें एक हल्का भूरा घोल प्राप्त हुआ। इस घोल को 10,000 आरपीएम पर 20 मिनट तक सेंट्रीफ्यूज किया गया, और फिर शुद्ध कार्बन क्वांटम डॉट्स को एकत्रित करने के लिए सुपरनेटेंट को 0.22 µm सिरिंज फिल्टर से गुजारा गया। तैयार किए गए कार्बन क्वांटम डॉट्स का संरचनात्मक विश्लेषण रेगाकू एक्स-रे विवर्तनमापी अल्टिमा IV का उपयोग करके उच्च-रिज़ॉल्यूशन एक्स-रे विवर्तनमापी (HRXRD) द्वारा किया गया। कार्बन क्वांटम डॉट्स का आकारिकीय लक्षण वर्णन JEOL JEM-F200 का उपयोग करके उच्च-रिज़ॉल्यूशन प्रेषण इलेक्ट्रॉन सूक्ष्मदर्शी (HRTEM) द्वारा किया गया। संश्लेषित नमूने के प्रकाशीय गुणों का अवलोकन लैम्डा 365 UV/VIS स्पेक्ट्रोफोटोमीटर के माध्यम से 200-1000 नैनोमीटर की तरंगदैर्ध्य सीमा में किया गया। प्रकाश संदीप्ति गुणों को RF-5301PC स्पेक्ट्रोफ्लोरोफोटोमीटर का उपयोग करके रिकॉर्ड किया गया। तैयार किए गए कार्बन क्वांटम डॉट्स की बनावट का अवलोकन उच्च-रिज़ॉल्यूशन एक्स-रे विवर्तनमापी (Cu लक्ष्य, λ=1.54056 Å (CuKα1) का उपयोग करके) द्वारा HRXRD विश्लेषण के माध्यम से किया गया। कार्बन क्वांटम डॉट्स की अनाकार ग्रेफाइट प्रकृति की पुष्टि HRXRD प्रोफ़ाइल (चित्र 1) द्वारा की गई, जिसमें 24.2° पर एक चौड़ा उभार है। यह उभार (002) तल को दर्शाता है जो कार्बन क्वांटम डॉट्स के भीतर उपस्थित समानांतर व्यवस्थित ग्रेफाइट परतों से मेल खाता है। कार्बन क्वांटम डॉट्स के आकार और आकृति विज्ञान का विश्लेषण करने के लिए HRTEM किया गया। HRTEM छवि संश्लेषित कार्बन क्वांटम डॉट्स में गोलाकार संरचना की उपस्थिति को दर्शाती हैए जिनके कणों का व्यास 10 nm से कम है।





चित्र १: कार्बन क्वांटम डॉट्स का HRXRD पैटर्न तथा HRTEM छवि

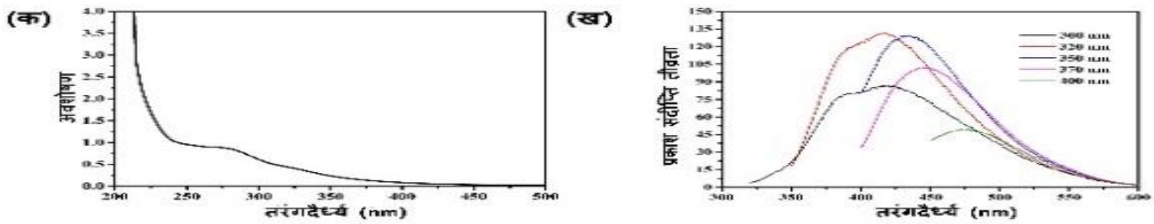
कार्बन क्वांटम डॉट्स के प्रकाशीय गुणों का विश्लेषण UV/VIS स्पेक्ट्रोस्कोपी द्वारा किया गया। UV/VIS स्पेक्ट्रोस्कोपी तकनीक निम्न तरंगदैर्ध्य क्षेत्र में विद्युत चुम्बकीय विकिरण का उपयोग करती है और आणविक संरचनाओं और कार्यात्मक समूहों की पहचान के लिए कार्बनिक पदार्थों के विश्लेषण में इसका व्यापक अनुप्रयोग है। π-इलेक्ट्रॉन या गैर-बंधन इलेक्ट्रॉन (non-bonding) (n-इलेक्ट्रॉन) वाले अणु पराबैंगनी या दृश्य विकिरण को अवशोषित कर सकते हैं, जिससे ये इलेक्ट्रॉन उच्च-ऊर्जा वाले प्रतिबंधन आणविक कक्षकों में संक्रमण कर सकते हैं। कार्बन क्वांटम डॉट्स के स्पेक्ट्रोस्कोपिक विश्लेषण में, इलेक्ट्रॉनिक, कंपन और चुंबकीय अवस्थाएँ महत्वपूर्ण भूमिका निभाती हैं। इनमें से, इलेक्ट्रॉनिक संक्रमणों में महत्वपूर्ण ऊर्जा अंतर शामिल होते हैं, और संबंधित फोटॉन विद्युत चुम्बकीय स्पेक्ट्रम के पराबैंगनी-दृश्य क्षेत्र में आते हैं, लगभग २०० से ८०० नैनोमीटर तक, जहाँ ४०० से ८०० नैनोमीटर दृश्य सीमा का प्रतिनिधित्व करता है। इस सीमा में देखे गए अवशोषण शिखरों को अणु के भीतर विशिष्ट बंधन प्रकारों के साथ सीधे सहसंबंधित किया जा सकता है, जिससे विभिन्न कार्यात्मक समूहों की उपस्थिति के बारे में जानकारी मिलती है।



चित्र २: विभिन्न इलेक्ट्रॉनिक संक्रमणों के लिए ऊर्जा स्तर आरेख (यह चित्र सन्दर्भ संख्या [1] से लिया गया है)।

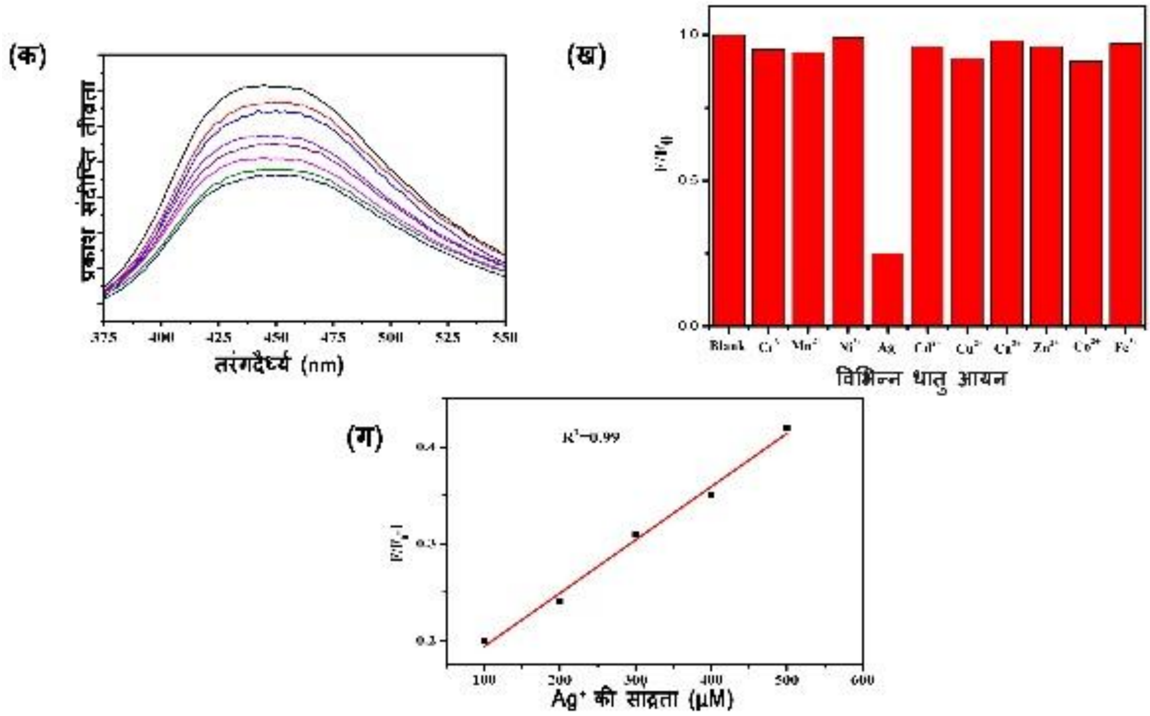
चित्र 2 कार्बनिक अणुओं में होने वाली विभिन्न प्रकार की इलेक्ट्रॉनिक उत्तेजनाओं को दर्शाता है। दर्शाए गए छह संक्रमणों में से, केवल सबसे कम ऊर्जा आवश्यकताओं वाले दो संक्रमण ही UV/VIS स्पेक्ट्रोस्कोपी द्वारा आमतौर पर कवर की जाने वाली 200-800 नैनोमीटर रेंज के भीतर सुलभ हैं। कार्बन क्वांटम डॉट्स के अवशोषण स्पेक्ट्रा (चित्र 3 (क)) में एक लंबी पूंछ दिखाई देती है जो C=C (280 नैनोमीटर) के π-π* संक्रमण और C=O (320 नैनोमीटर) के n-π* संक्रमण से संबंधित अवशोषण शिखर दर्शाती है। कार्बन क्वांटम डॉट्स की सामान्य विशेषता उत्तेजना-निर्भर प्रकृति है, [4] और इसे 300 नैनोमीटर से 400 नैनोमीटर की सीमा में विभिन्न उत्तेजना तरंग दैर्ध्य पर संश्लेषित कार्बन क्वांटम डॉट्स के प्रकाश संदीप्ति स्पेक्ट्रम (चित्र 3 (ख)) द्वारा देखा जा सकता है। कार्बन क्वांटम डॉट्स के प्रकाश संदीप्ति परिणाम 350 नैनोमीटर पर अधिकतम प्रतिदीप्ति दर्शाते हैं। उत्तेजना तरंग दैर्ध्य में वृद्धि के साथ, कार्बन क्वांटम डॉट्स के प्रकाश संदीप्ति स्पेक्ट्रा में एक रेड शिफ्ट देखा गया है। इस उत्तेजना-निर्भर उत्सर्जन प्रकृति की व्याख्या के लिए स्थापित सिद्धांत यह बताता है कि क्वांटम परिरोध (आकार) प्रभाव इस व्यवहार के लिए उतरदायी है। कार्बन क्वांटम डॉट्स का आकार और बैंड अन्तराल एक दूसरे पर विपरीत निर्भरता दर्शाते हैं। डॉट्स का आकार घटने पर बैंड अन्तराल चौड़ा होता है और आकार बढ़ने पर संकरा होता है। ऊर्जा अंतराल में भिन्नता कार्बन क्वांटम डॉट्स के असमान वितरण के कारण उत्पन्न होती है, जिससे उत्सर्जन तरंगदैर्ध्य व्यापक हो जाता है और लगभग संपूर्ण दृश्य स्पेक्ट्रम को कवर करता है। [5]

शुद्ध कार्बन क्वांटम डॉट्स स्टॉक विलयन के 100 μL को 5.0 मिली लीटर विआयनीकृत जल में मिलाया गया। सिल्वर नाइट्रेट ($AgNO_3$) के कार्यशील विलयन को 10 माइक्रो मोलर स्टॉक से विआयनीकृत जल में तनु करके प्राप्त किया गया। Ag^+ विलयन की कुछ मात्रा को कार्बन क्वांटम डॉट्स सस्पेंशन में मिलाकर Ag^+ की निम्नलिखित सांद्रताएँ प्राप्त की गई: 0, 100, 200, 300, 400 और 500 माइक्रो मोलर। प्रत्येक मिश्रण के प्रकाश संदीप्ति का अवलोकन 350 नैनोमीटर की उत्तेजना तरंगदैर्ध्य पर किया गया। मापन कमरे के तापमान पर, उद्भवन के बाद 5-मिनट के अंतराल पर किए गए।



चित्र ३: कार्बन क्वांटम डॉट्स का **(क)** UV/VIS स्पेक्ट्रा तथा **(ख)** प्रकाश संदीप्ति स्पेक्ट्रा।

Ag^+ के प्रति कार्बन क्वांटम डॉट्स की चयनात्मकता की जांच करने के लिए, विभिन्न धातु धनायनों (Cd^{2+}, Mn^{2+}, Ag^+, Ni^{2+}, Ca^{2+}, Cu^{2+}, Co^{2+}, Zn^{2+}, Cr^{3+}, और Fe^{3+}) के २० माइक्रो मोलर विलयनों के 10 माइक्रो लीटर को अलग-अलग कार्बन क्वांटम डॉट्स विलयन में मिलाया गया और कार्बन क्वांटम डॉट्स की प्रतिदीप्ति पर पड़ने वाले प्रभावों का मापन किया गया।



चित्र ४: (क) विभिन्न सांद्रता वाले Ag^+ के संपर्क में आने के बाद कार्बन क्वांटम डॉट्स विलयन के प्रकाश संदीप्ति स्पेक्ट्रा। **(ख)** कई धातु धनायनों के साथ परस्पर क्रिया करने पर कार्बन क्वांटम डॉट्स जांच के F/F_0 में भिन्नताएँ। **(ग)** 0–500 माइक्रो मोलर की रेंज में Ag^+ सांद्रता के मुकाबले $F_0/F - 1$ का रैखिक प्रतिगमन प्लॉट।

चित्र 4 (क) 0 से 500 माइक्रो मोलर सांद्रता सीमा में Ag^+ के साथ परस्पर क्रिया के बाद कार्बन क्वांटम डॉट्स के प्रकाश संदीप्ति स्पेक्ट्रम को दर्शाता है। कार्बन क्वांटम डॉट्स 450 नैनोमीटर पर एक प्रमुख उत्सर्जन शिखर दर्शाते हैं, और Ag^+ सांद्रता बढ़ने के साथ प्रकाश संदीप्ति का मान उत्तरोत्तर घटता जाता है। कार्बन क्वांटम डॉट्स में Ag^+ आयनों के प्रवेश के बाद देखी गई प्रकाश संदीप्ति शमन संभवतः कार्बन क्वांटम डॉट्स में ऑक्सीजन युक्त सतही कार्यात्मक समूहों के साथ Ag^+ की परस्पर क्रिया से संबंधित है। Ag^+ आयनों और इन कार्यात्मक समूहों के बीच समन्वय गैर-विकिरणकारी इलेक्ट्रॉन स्थानांतरण प्रक्रियाओं को बढ़ावा देता है, जिससे अंततः प्रतिदीप्ति तीव्रता का दमन होता है। चित्र 4 (ग) में F/F_0 के साथ सांद्रता भिन्नता को दर्शाया गया है (F और F_0 क्रमशः धातु आयन (Ag^+) की उपस्थिति और अनुपस्थिति में प्रकाश संदीप्ति तीव्रता को प्रदर्शित करते हैं)। 0–500 माइक्रो मोलर सीमा पर एक मजबूत रैखिक प्रतिगमन प्लॉट प्राप्त हुआ, जिसका सहसंबंध गुणांक (R^2) 0.99 था, जो स्टर्न-वोल्मर मॉडल के अनुरूप है। Ag^+ के लिए पता लगाने की सीमा 10 माइक्रो मोलर मापी गई, जो दर्शाता है कि संश्लेषित कार्बन क्वांटम डॉट्स Ag^+ का पता लगाने के लिए पर्याप्त रूप से संवेदनशील हैं। जैसा कि चित्र 4 (ख) में दिखाया गया है, समान सांद्रता (20 माइक्रो मोलर) पर अन्य धातु आयनों की तुलना में केवल Ag^+ ने ही स्पष्ट प्रतिदीप्ति तीव्रता का शमन उत्पन्न किया, जो दर्शाता है कि कार्बन क्वांटम डॉट्स अन्य आयनों की तुलना में Ag^+ के लिए उत्कृष्ट चयनात्मकता प्रदर्शित करते हैं।

3. उपसंघार

कार्बन क्वांटम डॉट्स के संश्लेषण के लिए एक टिकाऊ और किफायती हाइड्रोथर्मल विधि अपनाई गई। HRXRD और HRTEM विश्लेषण से अनाकार-ग्रेफाइटिक संरचना का पता चला और 10 नैनोमीटर से कम आकार के गोलाकार डॉट्स की उपस्थिति की पुष्टि हुई। संश्लेषित कार्बन क्वांटम डॉट्स के UV-Vis स्पेक्ट्रा में 280 नैनोमीटर और 320 नैनोमीटर पर क्रमशः π-π* संक्रमण और n-π* संक्रमण को दर्शाने वाले दो अवशोषण शिखर हैं, जिनमें एक विस्तारित पूंछ है। संश्लेषित कार्बन क्वांटम डॉट्स के प्रकाश संदीप्ति स्पेक्ट्रा क्वांटम आकार प्रभाव के कारण कई उत्तेजना तरंग दैर्ध्य के लिए उत्तेजना-निर्भर व्यवहार दर्शाते हैं। हमने यह भी प्रदर्शित किया है कि हमारे संश्लेषित जल में घुलनशील कार्बन क्वांटम डॉट्स Ag^+ का पता लगाने के लिए एक उत्कृष्ट संवेदन यंत्र हैं।

संदर्भ ग्रंथ सूची (Bibliography/References)

[1] Srivastava, A. Studies of semiconductor quantum dots and its applications [Deen Dayal Upadhyay Gorakhpur University]. 2025. https://shodhganga.inflibnet.ac.in/handle/10603/689355.

[2] Srivastava, A., Khan, Z. M. S. H., Akhtar, M. S., & Khan, S. A. Nitrogen self-doped desiccated coconut–derived carbon dots as optical nanoprobe sensor for the detection of heavy metal ion Hg^{2+}. Emergent Materials 2024; 7 (4):1819–29. https://doi.org/10.1007/s42247-024-00704-2

[3] Srivastava, A., & Khan, S. A. Graphene Quantum Dots-Based Heterojunction Solar Cells. In S. Ameen, M. S. Akhtar, & I. Kong (Eds.), Nanomaterials for Sensors and Sustainable Energy Volume 1. Springer Nature Singapore 2025; 219–40. https://doi.org/10.1007/978-981-96-0660-3_10.

[4] Khan, Z. M. S. H., Saifi, S., Shumaila, Aslam, Z., Khan, S. A., & Zulfequar, M. A facile one step hydrothermal synthesis of carbon quantum dots for label -free fluorescence sensing approach to detect picric acid in aqueous solution. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 2020; 388:112201. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112201.

[5] Khan, Z. M. S. H., Rahman, R. S., Shumaila, Islam, S., & Zulfequar, M. Hydrothermal treatment of red lentils for the synthesis of fluorescent carbon quantum dots and its application for sensing Fe^{3+}. Optical Materials 2019; 91: 386–95. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.03.054.