खंड १, अंक १, जनवरी–२०२६
ई–विज्ञानम
मासिक विज्ञान पत्रिका

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

सामान्य आलेख- प्रौद्योगिकी (General Article-Technology)

DOI: 10.66346/ev.v1i1.2026.10

# उच्च-संवेदनशील सेंसिंग अनुप्रयोगों के लिए फोटोनिक टाइम क्रिस्टल: एक समालोचनात्मक समीक्षा

प्रतिष्ठा पांडेय[1]*, डी.के. द्विवेदी
फोटोनिक्स एवं फोटोवोल्टाइक अनुसंधान प्रयोगशाला
भौतिकी एवं पदार्थ विज्ञान विभाग मोहन,मदन मालवीय प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय, गोरखपुर, भारत–273010
लेखक से संवाद के लिए ईमेल*- pandeypratishtha18@gmail.com

आलेख प्राप्त: ०४ फरवरी २०२६; अंतिम संशोधन: १९ फरवरी २०२६; स्वीकृत: २० फरवरी २०२६
प्रथम ऑनलाइन प्रकाशित: १८ मार्च २०२६

## सारांश

फोटोनिक टाइम क्रिस्टल समय-आधारित आवधिक फोटोनिक प्रणालियों की एक नवीन श्रेणी हैं जिनमें माध्यम के भौतिक गुण, विशेषकर अपवर्तनांक या पारगम्यता समय के साथ आवधिक रूप से परिवर्तित होते हैं। पारंपरिक स्थानिक फोटोनिक क्रिस्टलों के विपरीत फोटोनिक टाइम क्रिस्टल फ्रीक्वेंसी बैंडगैप, नॉन-हर्मिशियन गतिकी तथा असाधारण बिंदुओं की उपस्थिति प्रदर्शित करते हैं। हाल के अध्ययनों से यह सिद्ध हुआ है कि ये अद्वितीय गुण अत्यधिक संवेदनशील फोटोनिक सेंसिंग के लिए अत्यंत उपयोगी हैं और पारंपरिक रेज़ोनेटर-आधारित सेंसर्स की सीमाओं को पार कर सकते हैं। यह लेख फोटोनिक टाइम क्रिस्टल आधारित सेंसिंग की सैद्धांतिक नींव भौतिक तंत्र हालिया प्रगति तथा भविष्य की संभावनाओं का विस्तृत विश्लेषण प्रस्तुत करता है।

मुख्य शब्द: फोटोनिक टाइम क्रिस्टल; समयीय माड्यूलेटेड माध्यम; नॉन-हर्मिशियन फोटोनिक्स; असाधारण बिंदु; फ्लोके बैंड संरचना; अच्छा स्वास्थ्य और कल्याण

खंड १, अंक १, जनवरी–२०२६
ई–विज्ञानम
मासिक विज्ञान पत्रिका

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

सामान्य आलेख- प्रौद्योगिकी (General Article-Technology)

DOI: 10.66346/ev.v1i1.2026.10

# Photonic Time Crystals for High-Sensitivity Sensing Applications: A Critical Review

Pratishtha Pandey*, D. K. Dwivedi
Photonics and Photovoltaic Research Laboratory (PPRL)
Department of Physics and Materials Science
Madan Mohan Malaviya University of Technology, Gorakhpur, India-273010

Corresponding author Email*: pandeypratishtha18@gmail.com

Received on: 04 February 2026; Final Revision: 19 February 2026; Accepted: 20 February 2026
Published Online First: 18 March 2026

**ABSTRACT**

Photonic time crystals represent an emerging area in photonics in which the optical properties of a medium-particularly the refractive index vary periodically in time rather than in space. This temporal periodicity leads to unconventional behaviour in light propagation, energy exchange, and band structure, fundamentally distinct from that observed in conventional spatial photonic crystals. This review article presents a comprehensive discussion of the fundamental principles and physical interpretations of photonic time crystals, recent research advances, experimental realization techniques, and their potential applications, with a particular focus on high-sensitivity sensing.

**Keywords-** Photonic time crystals; time-modulated media; non-Hermitian photonics; exceptional points; Floquet band structure; good health and well-being

## 1. भूमिका

फोटोनिक सेंसिंग आधुनिक विज्ञान और प्रौद्योगिकी में एक केंद्रीय भूमिका निभाती है जहाँ अत्यंत सूक्ष्म भौतिक रासायनिक एवं जैविक परिवर्तनों का उच्च सटीकता के साथ पता लगाना आवश्यक होता है। पारंपरिक फोटोनिक सेंसर जैसे कि रिंग रेज़ोनेटर ब्रैग ग्रेटिंग और स्थानिक फोटोनिक क्रिस्टल, सामान्यतः स्थानिक संरचना एवं अनुनाद प्रवर्धन पर आधारित होते हैं। हालाँकि इन प्रणालियों की संवेदनशीलता आंतरिक हानियों, गुणवत्ता गुणांक (Q-factor) तथा निर्माण-संबंधी सीमाओं से बंधी रहती है।

फोटोनिक टाइम क्रिस्टल इस संदर्भ में एक मौलिक परिवर्तन प्रस्तुत करते हैं, क्योंकि ये प्रकाश-माध्यम अंतःक्रिया को स्थान के बजाय समय के माध्यम से नियंत्रित करते हैं। समय-आधारित आवधिकता के कारण ऐसी प्रणालियों में नई सेंसिंग रणनीतियाँ संभव हो जाती हैं, जो पारंपरिक स्थानिक फोटोनिक्स की सीमाओं से परे जाती हैं।

पारंपरिक फोटोनिक क्रिस्टल प्रकाशीय माध्यमों की वह श्रेणी हैं जिनमें अपवर्तनांक की आवधिकता स्थानिक निर्देशांकों के साथ परिभाषित होती है। इस स्थानिक आवधिकता के परिणामस्वरूप फोटोनिक बैंड संरचना उत्पन्न होती है, जो इलेक्ट्रॉनिक क्रिस्टलों की ऊर्जा बैंड संरचना के समान व्यवहार प्रदर्शित करती है। इन प्रणालियों में विशिष्ट आवृत्ति क्षेत्रों में प्रकाशीय तरंगों का प्रसार प्रतिबंधित हो जाता है, जिसे फोटोनिक बैंडगैप के रूप में जाना जाता है। चूँकि माध्यम के गुण समय के साथ अपरिवर्तित रहते हैं, इसलिए पारंपरिक फोटोनिक क्रिस्टल ऊर्जा-संरक्षित तथा हर्मिशियन प्रणालियों का प्रतिनिधित्व करते हैं, जहाँ प्रकाश की आवृत्ति संरक्षित रहती है और वेव-वेक्टर में परिवर्तन होता है।

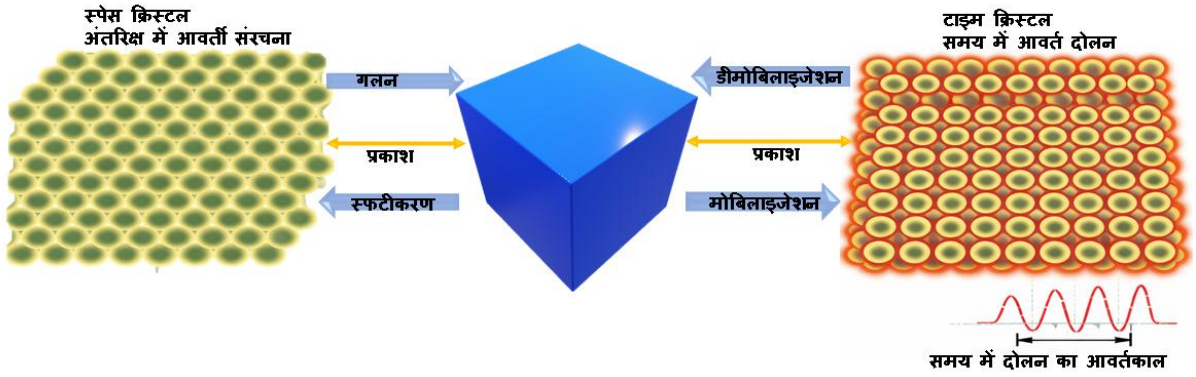
इसके विपरीत, फोटोनिक टाइम क्रिस्टल एक नवीन श्रेणी की प्रकाशीय प्रणालियाँ हैं जिनमें माध्यम के भौतिक गुण, विशेष रूप से अपवर्तनांक, समय के साथ आवधिक रूप से परिवर्तित होते हैं। इस समय-आधारित आवधिकता के कारण प्रणाली में स्थानिक समरूपता बनी रहती है जिसके परिणामस्वरूप वेव-वेक्टर संरक्षित रहता है, जबकि प्रकाश की आवृत्ति में परिवर्तन संभव हो जाता है। यह विशेषता फोटोनिक टाइम क्रिस्टल को पारंपरिक फोटोनिक क्रिस्टल से मौलिक रूप से भिन्न बनाती है और प्रकाश-माध्यम अंतःक्रिया के नए तंत्रों को जन्म देती है।

फोटोनिक टाइम क्रिस्टल में समय-माड्यूलेशन के कारण माध्यम और प्रकाश के बीच ऊर्जा का आदान-प्रदान होता है, जिससे प्रणाली स्वाभाविक रूप से नॉन-हर्मिशियन प्रकृति की हो जाती है[1,2]। इस नॉन-हर्मिशियन व्यवहार के परिणामस्वरूप फ्रीक्वेंसी बैंडगैप,असाधारण बिंदु तथा टोपोलॉजिकल संक्रमण जैसी परिघटनाएँ उत्पन्न होती हैं जो पारंपरिक फोटोनिक क्रिस्टल में सामान्यतः अनुपस्थित होती हैं। विशेष रूप से, असाधारण बिंदुओं के समीप प्रकाशीय प्रतिक्रियाओं की अत्यधिक संवेदनशीलता फोटोनिक सेंसर तथा नॉन-रिकिप्रोकल उपकरणों के विकास के लिए महत्वपूर्ण संभावनाएँ प्रदान करती है[3]।

समग्र रूप से देखा जाए तो पारंपरिक फोटोनिक क्रिस्टल जहाँ स्थानिक संरचना के माध्यम से प्रकाश के प्रसार को नियंत्रित करते हैं, वहीं फोटोनिक टाइम क्रिस्टल समय-आधारित संरचना के माध्यम से प्रकाश की आवृत्ति, चरण तथा ऊर्जा विनिमय को नियंत्रित करने का एक नया मंच प्रदान करते हैं। इस कारण फोटोनिक टाइम क्रिस्टल आधुनिक फोटोनिक्स, नॉन-हर्मिशियन भौतिकी तथा टोपोलॉजिकल प्रकाशिकी के क्षेत्र में अनुसंधान की एक अत्यंत सक्रिय और उभरती हुई दिशा के रूप में स्थापित हो रहे हैं।

यद्यपि फोटोनिक टाइम क्रिस्टल आधारित सेंसिंग ने उल्लेखनीय सैद्धांतिक और प्रारंभिक प्रयोगात्मक प्रगति प्रदर्शित की है, फिर भी इसके व्यावहारिक कार्यान्वयन में कई चुनौतियाँ बनी हुई हैं। प्रमुख चुनौती उच्च-गति एवं स्थिर समयीय माड्यूलेशन को सटीक रूप से नियंत्रित करने से संबंधित है, विशेषकर ऑप्टिकल आवृत्ति क्षेत्रों में। इसके अतिरिक्त, नॉन-हर्मिशियन प्रणालियों में शोर, अस्थिरता तथा लाभ-हानि असंतुलन का प्रभाव सेंसिंग की विश्वसनीयता को प्रभावित कर सकता है।

भविष्य की दिशाओं में एकीकृत फोटोनिक प्लेटफॉर्म, मेटासर्फेस आधारित फोटोनिक टाइम क्रिस्टल तथा प्रोग्रामेबल समयीय माड्यूलेशन तकनीकों का विकास महत्वपूर्ण भूमिका निभाएगा। उच्च-क्रम असाधारण बिंदुओं (EP3, EP4) का व्यावहारिक साकार रूप तथा क्वांटम शोर के प्रभावों का व्यवस्थित अध्ययन भी आने वाले अनुसंधान का एक प्रमुख विषय होगा[4]। इन प्रगतियों के साथ यह अपेक्षा की जाती है कि फोटोनिक टाइम क्रिस्टल आधारित सेंसिंग अगली पीढ़ी की अल्ट्रा-सेंसिटिव और बहु-कार्यात्मक सेंसिंग तकनीकों की आधारशिला बनेगी।




**चित्र1-** स्पेस क्रिस्टल और टाइम क्रिस्टल की तुलनात्मक अवधारणा

## 2. फोटोनिक टाइम क्रिस्टल का सैद्धांतिक संरचना

एक आदर्श फोटोनिक टाइम क्रिस्टल में अपवर्तनांक को सामान्यतः निम्न रूप में व्यक्त किया जाता है:

$$n(t) = n_0 + \Delta n \cos(\Omega t) \quad (1)$$

जहाँ $n_0$ स्थिर अपवर्तनांक, $\Delta n$ समय-माड्यूलेशन की तीव्रता तथा $\Omega$ माड्यूलेशन की कोणीय आवृत्ति है।

इस प्रकार की समय-निर्भरता मैक्सवेल समीकरणों को गैर-स्वायत्त बना देती है और प्रणाली को Floquet प्रकृति प्रदान करती है[5]।

परिणामस्वरूप फोटोनिक टाइम क्रिस्टल में फ्रीक्वेंसी डोमेन में बैंड संरचना तथा बैंडगैप उत्पन्न होते हैं। चूँकि प्रणाली में माध्यम और प्रकाश के बीच ऊर्जा का आदान-प्रदान होता है, इसलिए ऊर्जा संरक्षण का नियम लागू नहीं रहता और प्रणाली स्वाभाविक रूप से नॉन-हर्मिशियन बन जाती है[6]। यही विशेषता फोटोनिक टाइम क्रिस्टल को सेंसिंग अनुप्रयोगों के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण बनाती है

## 3. फोटोनिक टाइम क्रिस्टल आधारित सेंसिंग तंत्र

फोटोनिक टाइम क्रिस्टल आधारित सेंसिंग का सैद्धांतिक आधार समय-निर्भर माध्यम में मैक्सवेल समीकरणों की गैर-स्वायत्त प्रकृति से उत्पन्न होता है। किसी समरूप माध्यम में जहाँ विद्युत पारगम्यता समय के साथ आवधिक रूप से परिवर्तित होती है, उसे सामान्यतः निम्न प्रकार निरूपित किया जा सकता है:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon \cos(\Omega t) \quad (2)$$

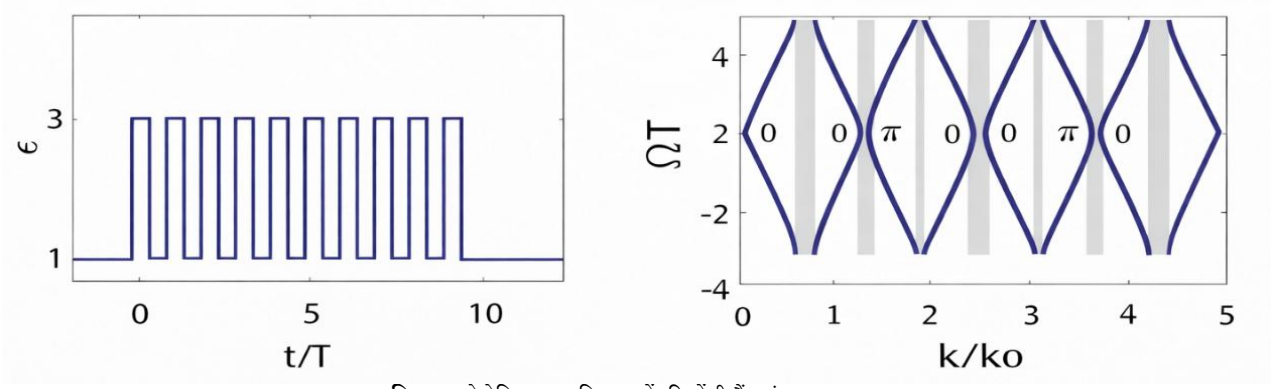
जहाँ $\varepsilon_0$ स्थिर पारगम्यता, $\Delta\varepsilon$ माड्यूलेशन आयाम तथा $\Omega$ समयीय माड्यूलेशन की कोणीय आवृत्ति है। इस समय-निर्भरता के कारण तरंग समीकरण निम्न रूप ग्रहण करता है[7]:

$$\nabla^2 \mathrm{E} - \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2}[\varepsilon(t)\mathrm{E}] = 0 \quad (3)$$

यह समीकरण Floquet प्रकार का बन जाता है, जिसके समाधान समयीय Bloch अवस्थाओं के रूप में लिखे जा सकते हैं:

$$\mathrm{E}(t) = e^{-i\omega t} \sum_n \mathrm{E}_n e^{-in\Omega t} \quad (4)$$

यहाँ $\omega$ क्वासी-आवृत्ति (quasi-frequency) है।




**चित्र 2-** फोटोनिक टाइम क्रिस्टल में फ्रीक्वेंसी बैंड संरचना

### 3.1. फ्रीक्वेंसी-शिफ्ट आधारित सेंसिंग

फोटोनिक टाइम क्रिस्टल में वेव-वेक्टर $k$ संरक्षित रहता है, जबकि बाहरी व्यवधानों के कारण प्रणाली की क्वासी-आवृत्ति $\omega$ परिवर्तित होती है। यदि किसी पर्यावरणीय पैरामीटर $p$ (जैसे अपवर्तनांक या तापमान) में सूक्ष्म परिवर्तन $\delta p$ उत्पन्न होता है, तो आवृत्ति स्थानांतरण को प्रथम कोटि में निम्न प्रकार लिखा जा सकता है:

$$\delta\omega = \left(\frac{\partial\omega}{\partial p}\right)\delta p \quad (5)$$

फोटोनिक टाइम क्रिस्टल में $\partial\omega/\partial p$ का मान पारंपरिक स्थानिक फोटोनिक प्रणालियों की तुलना में अधिक होता है, जिसके परिणामस्वरूप संवेदनशीलता में उल्लेखनीय वृद्धि होती है।

### 3.2. समयीय बैंडगैप मॉड्यूलेशन आधारित सेंसिंग

समयीय आवधिकता के कारण फोटोनिक टाइम क्रिस्टल में विशिष्ट आवृत्तियों पर बैंडगैप उत्पन्न होते हैं। कमजोर माड्यूलेशन की स्थिति में, प्रथम क्रम का बैंडगैप लगभग निम्न प्रकार व्यक्त किया जा सकता है:

$$\Delta\omega_{\mathrm{gap}} \approx \frac{\omega_0}{2}\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

जहाँ $\omega_0$ ब्रैग-शर्त को संतुष्ट करने वाली केंद्रीय आवृत्ति है। यदि बाहरी व्यवधान के कारण

$\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon + \delta(\Delta\varepsilon)$ होता है, तो बैंडगैप में परिवर्तन: $\delta(\Delta\omega_{\mathrm{gap}}) \propto \delta(\Delta\varepsilon)$ के रूप में प्राप्त होता है। यह बैंडगैप परिवर्तन सेंसिंग संकेत के रूप में उपयोग किया जाता है।

### 3.3. असाधारण बिंदु आधारित सेंसिंग (Exceptional-Point Sensing)

फोटोनिक टाइम क्रिस्टल में असाधारण बिंदु आधारित सेंसिंग नॉन-हर्मिशियन गतिकी से उत्पन्न एक अत्यंत प्रभावी तंत्र है, जिसमें प्रणाली की प्रकाशीय प्रतिक्रिया बाहरी व्यवधानों के प्रति असामान्य रूप से तीव्र संवेदनशीलता प्रदर्शित करती है। असाधारण बिंदु वे विशिष्ट स्थितियाँ होती हैं जहाँ प्रणाली के स्वमान (eigenvalues) और स्ववेक्टर (eigenvectors) दोनों एक-दूसरे में विलीन हो जाते हैं। फोटोनिक टाइम क्रिस्टल में यह स्थिति सामान्यतः समयीय माड्यूलेशन द्वारा उत्पन्न प्रभावी लाभ-हानि संतुलन और मोड-कपलिंग के कारण प्राप्त होती है।

गणितीय रूप से, EP-based सेंसिंग को समझने के लिए फोटोनिक टाइम क्रिस्टल के दो प्रमुख समयीय मोडों के बीच की अंतःक्रिया को एक प्रभावी द्वि-मोडीय नॉन-हर्मिशियन Hamiltonian द्वारा निरूपित किया जा सकता है[5,8]:

$$H_{\text{eff}} = \begin{pmatrix} \omega_0 + i\gamma & g \\ g & \omega_0 - i\gamma \end{pmatrix},$$

जहाँ $\omega_0$ केंद्रीय क्वासी-आवृत्ति, $g$ मोड-कपलिंग स्थिरांक तथा $\gamma$ समयीय माड्यूलेशन से उत्पन्न प्रभावी लाभ/हानि पैरामीटर को दर्शाता है। इस Hamiltonian के स्वमान निम्न प्रकार प्राप्त होते हैं:

$$\lambda_{\pm} = \omega_0 \pm \sqrt{g^2 - \gamma^2}.$$

जब $g = \gamma$, तब वर्गमूल पद शून्य हो जाता है और दोनों स्वमान तथा उनके संबंधित स्ववेक्टर एक ही बिंदु पर सहस्थित हो जाते हैं। यही स्थिति द्वितीय-क्रम असाधारण बिंदु (EP2) कहलाती है।

EP-based सेंसिंग का मूल लाभ यह है कि EP के समीप प्रणाली की प्रतिक्रिया बाहरी व्यवधानों के प्रति गैर-रेखीय स्केलिंग प्रदर्शित करती है। यदि किसी बाहरी पर्यावरणीय पैरामीटर $p$ में सूक्ष्म परिवर्तन $\epsilon$ उत्पन्न होता है, तो यह Hamiltonian में एक छोटा विक्षोभ जोड़ देता है, जिसके परिणामस्वरूप स्वमान विभाजन निम्न प्रकार स्केल करता है:

$$\Delta\lambda \propto \epsilon^{1/2}.$$

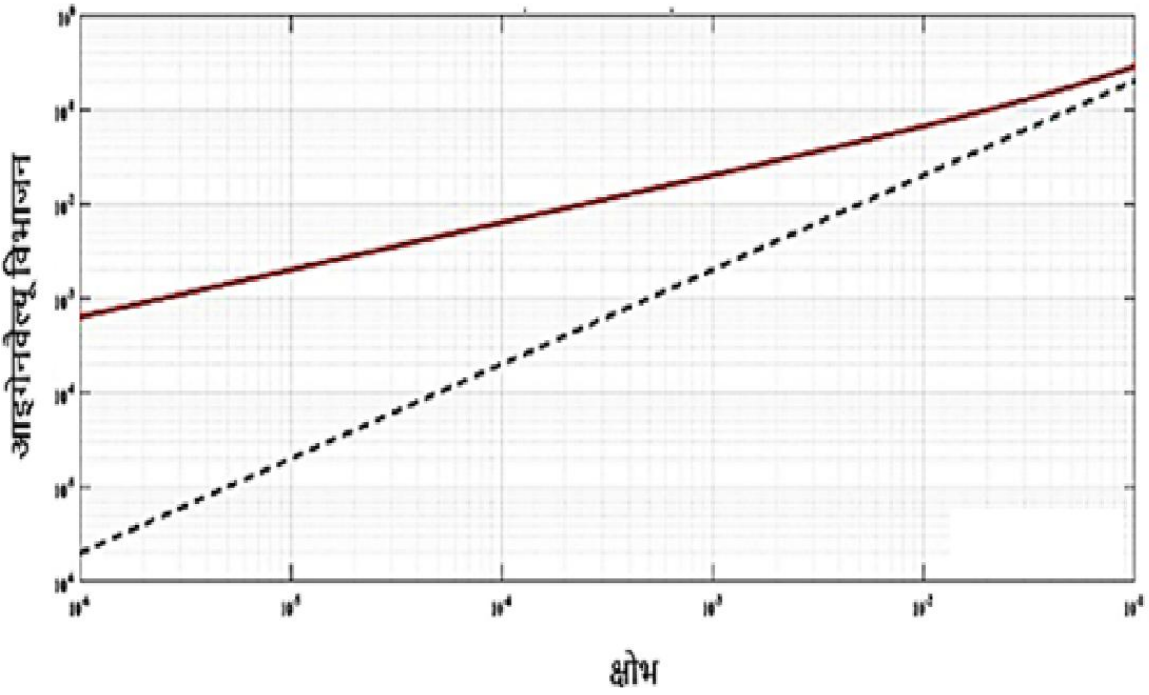
यह वर्गमूल-आधारित निर्भरता पारंपरिक हर्मिशियन प्रणालियों में पाई जाने वाली रैखिक स्केलिंग ($\Delta\lambda \propto \epsilon$) की तुलना में कहीं अधिक संवेदनशील प्रतिक्रिया उत्पन्न करती है। इसी कारण EP के समीप कार्यरत फोटोनिक टाइम क्रिस्टल सेंसर अत्यंत सूक्ष्म अपवर्तनांक, तापमान अथवा बाहरी क्षेत्र परिवर्तनों का भी प्रभावी रूप से पता लगाने में सक्षम होते हैं।

उच्च-क्रम असाधारण बिंदुओं की स्थिति में यह संवेदनशीलता और अधिक बढ़ जाती है। यदि प्रणाली को $N$-क्रम असाधारण बिंदु (EP$N$) पर संचालित किया जाए, तो स्वमान विभाजन का स्केलिंग नियम सामान्यतः

$$\Delta\lambda \propto \epsilon^{1/N}$$

के रूप में प्राप्त होता है। इससे स्पष्ट है कि जैसे-जैसे EP का क्रम बढ़ता है, प्रणाली की सेंसिंग क्षमता और अधिक तीव्र होती जाती है। फोटोनिक टाइम क्रिस्टल में समयीय माड्यूलेशन के माध्यम से ऐसे उच्च-क्रम EPs का साकार किया जाना सैद्धांतिक रूप से संभव है, जो अल्ट्रा-हाई-सेंसिटिव सेंसिंग प्लेटफॉर्म के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण है।

इसके अतिरिक्त, EP-based फोटोनिक टाइम क्रिस्टल सेंसिंग में फ्रीक्वेंसी-डोमेन मापन एक महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। चूँकि आउटपुट संकेत आवृत्ति स्थानांतरण के रूप में प्राप्त होता है, इसलिए यह तकनीक तीव्र शोर के प्रति अपेक्षाकृत अधिक स्थिर होती है और उच्च सटीकता वाले स्पेक्ट्रल मापन की अनुमति देती है। इस प्रकार, असाधारण बिंदु आधारित सेंसिंग फोटोनिक टाइम क्रिस्टल को पारंपरिक रेज़ोनेटर-आधारित सेंसरों से भिन्न और अधिक शक्तिशाली बनाती है। चित्र से यह स्पष्ट रूप से देखा जा सकता है कि छोटे $\epsilon$ के क्षेत्र में EP-आधारित सेंसिंग (लाल रेखा) और पारंपरिक सेंसिंग (काली रेखा) के बीच कई क्रम का अंतर उत्पन्न हो जाता है। यही अंतर संवेदनशीलता वृद्धि) का मूल कारण है और EP-आधारित सेंसिंग को अल्ट्रा-सेंसिटिव सेंसिंग अनुप्रयोगों के लिए अत्यंत आकर्षक बनाता है।




**चित्र 3**-असाधारण बिंदु के समीप संवेदनशीलता में वृद्धि। (सॉलिड रेखा के द्वारा ई-पी आधारित सेंसिंग को दर्शाया गया है जबकि डैश रेखा के द्वारा परम्परागत सेंसिंग को दर्शाया गया है)

## 4. सेंसिंग में अनुप्रयोग

हालिया अनुसंधानों के अनुसार, फोटोनिक टाइम क्रिस्टल आधारित सेंसिंग विभिन्न भौतिक एवं रासायनिक प्रणालियों में अत्यधिक संभावनाएँ प्रदर्शित करती है, क्योंकि समय-आधारित आवधिकता प्रकाशीय संकेतों को सीधे फ्रीक्वेंसी डोमेन में नियंत्रित करने की अनुमति देती है। विशेष रूप से, अपवर्तनांक एवं डायइलेक्ट्रिक वातावरण सेंसिंग में फोटोनिक टाइम क्रिस्टल अत्यंत प्रभावी सिद्ध होते हैं। किसी परिवेश में उपस्थित माध्यम के अपवर्तनांक या पारगम्यता में सूक्ष्म परिवर्तन समयीय बैंड संरचना में आवृत्ति स्थानांतरण उत्पन्न करता है, जिसे उच्च सटीकता वाले स्पेक्ट्रल मापन द्वारा आसानी से पहचाना जा सकता है। असाधारण बिंदुओं के समीप संचालित प्रणालियों में यह आवृत्ति स्थानांतरण गैर-रेखीय रूप से बढ़ जाता है, जिससे अत्यंत सूक्ष्म परिवर्तनों का भी प्रभावी पता लगाया जा सकता है।

जैव-सेंसिंग एवं रासायनिक पहचान के क्षेत्र में, फोटोनिक टाइम क्रिस्टल आधारित प्लेटफॉर्म विशेष रुचि का विषय बनते जा रहे हैं। जैविक अणुओं या रासायनिक प्रजातियों के अवशोषण अथवा बाइंडिंग के कारण स्थानीय डायइलेक्ट्रिक गुणों में होने वाला परिवर्तन सीधे समयीय माड्यूलेशन से उत्पन्न क्वासी-आवृत्तियों को प्रभावित करता है। चूँकि यह सेंसिंग फ्रीक्वेंसी-डोमेन में संपन्न होती है, इसलिए यह तकनीक पारंपरिक इंटेंसिटी-आधारित जैव-सेंसर्स की तुलना में शोर के प्रति अधिक स्थिर होती है और उच्च चयनात्मकता प्रदान करती है।

फोटोनिक टाइम क्रिस्टल तापमान, तनाव एवं यांत्रिक विकृति सेंसिंग के लिए भी एक शक्तिशाली मंच प्रदान करते हैं। तापीय या यांत्रिक प्रभावों के कारण माध्यम के भौतिक गुणों में होने वाले सूक्ष्म परिवर्तन समयीय माड्यूलेशन की प्रभावी तीव्रता और आवृत्ति को परिवर्तित कर देते हैं। परिणामस्वरूप, आउटपुट स्पेक्ट्रम में मापनीय फ्रीक्वेंसी शिफ्ट अथवा बैंडगैप परिवर्तन उत्पन्न होते हैं। EP-आधारित संचालन में यह प्रभाव और अधिक प्रबल हो जाता है, जिससे संरचनात्मक स्वास्थ्य निगरानी एवं माइक्रो-नैनो यांत्रिक प्रणालियों के लिए उच्च-संवेदनशील सेंसिंग संभव होती है।

इसके अतिरिक्त माइक्रोवेव एवं टेराहर्ट्ज़ मेट्रोलॉजी में फोटोनिक टाइम क्रिस्टल विशेष रूप से उपयोगी हैं, क्योंकि इन आवृत्ति क्षेत्रों में समय-आधारित माड्यूलेशन को व्यावहारिक रूप से लागू करना अपेक्षाकृत सरल होता है। समयीय बैंडगैप और नॉन-रिकिप्रोकल फ्रीक्वेंसी कन्वर्ज़न के माध्यम से अत्यंत सूक्ष्म फ्रीक्वेंसी विचलनों और फेज़ परिवर्तनों का पता लगाया जा सकता है, जो उच्च-सटीकता मेट्रोलॉजिकल अनुप्रयोगों के लिए महत्वपूर्ण है।

अंततः फोटोनिक टाइम क्रिस्टल क्वांटम-सीमित उच्च-सटीकता सेंसिंग के क्षेत्र में भी उभरते हुए प्लेटफॉर्म के रूप में देखे जा रहे हैं। नॉन-हर्मिशियन गतिकी और असाधारण बिंदुओं के कारण उत्पन्न संवेदनशीलता वृद्धि, क्वांटम शोर सीमा के समीप कार्यरत प्रणालियों में सिग्नल प्रवर्धन के नए मार्ग खोलती है[5,8]। इस प्रकार, फोटोनिक टाइम क्रिस्टल भविष्य की क्वांटम सेंसिंग एवं क्वांटम सूचना प्रौद्योगिकियों के लिए भी अत्यंत प्रासंगिक हैं।

इन सभी अनुप्रयोगों में यह विशेष रूप से उल्लेखनीय है कि फ्रीक्वेंसी-डोमेन मापन की केंद्रीय भूमिका होती है। चूँकि सेंसिंग संकेत आवृत्ति स्थानांतरण या बैंड संरचना परिवर्तन के रूप में प्राप्त होते हैं, इसलिए यह दृष्टिकोण पारंपरिक स्थानिक रेज़ोनेटर-आधारित तकनीकों की गुणवत्ता गुणांक एवं विवर्तन-सीमाओं से जुड़ी समस्याओं को काफी हद तक कम करता है।

## 5. निष्कर्ष

फोटोनिक टाइम क्रिस्टल आधारित सेंसिंग समय-आधारित आवधिकता के माध्यम से प्रकाश–माध्यम अंतःक्रिया को नियंत्रित करने का एक मौलिक रूप से नया दृष्टिकोण प्रस्तुत करती है। नॉन-हर्मिशियन गतिकी और असाधारण बिंदुओं की उपस्थिति पारंपरिक रैखिक सेंसिंग सीमाओं से परे संवेदनशीलता वृद्धि को संभव बनाती है। विशेष रूप से, वर्गमूल एवं उच्च-क्रम स्केलिंग व्यवहार यह दर्शाता है कि अत्यंत सूक्ष्म पर्यावरणीय व्यवधान भी मापनीय फ्रीक्वेंसी संकेत उत्पन्न कर सकते हैं। फ्रीक्वेंसी-डोमेन आधारित मापन तकनीकें शोर के प्रति अधिक स्थिरता प्रदान करती हैं और गुणवत्ता गुणांक तथा स्थानिक विवर्तन सीमाओं पर निर्भरता को कम करती हैं। एकीकृत फोटोनिक प्लेटफॉर्म और मेटासर्फेस आधारित समयीय माड्यूलेशन के विकास से व्यावहारिक कार्यान्वयन की संभावनाएँ और प्रबल होती जा रही हैं। साथ ही, उच्च-क्रम असाधारण बिंदुओं तथा क्वांटम शोर के प्रभावों का अध्ययन भविष्य की क्वांटम-सीमित सेंसिंग तकनीकों के लिए नए अवसर प्रदान करता है। समग्र रूप से, फोटोनिक टाइम क्रिस्टल फोटोनिक्स, नॉन-हर्मिशियन भौतिकी और सेंसिंग विज्ञान के संगम पर स्थित एक उभरता हुआ मंच है, जो अगली पीढ़ी की अल्ट्रा-सेंसिटिव और अनुकूलनीय सेंसिंग प्रणालियों के विकास में निर्णायक भूमिका निभा सकता है।

## संदर्भ ग्रंथ सूची (Bibliography/References)

[1]. Asgari, M. M., Garg, P., et al. (2024). Photonic time crystals: Theory and applications, 1–98. http://arxiv.org/abs/2404.04899
[2]. El-ganainy, R., Makris, K. G., et al. (2018). Non-Hermitian physics and PT symmetry. Nature photonics, 14(1), 11–19. https://doi.org/10.1038/nphys4323
[3]. Feng, L., Ge, L., Lu, M. H., & Schomerus, H. (2025). Non-Hermitian photonics: Applied Physics Letters, 126(3). https://doi.org/10.1063/5.0256846
[4]. Heiss, W. D. (2012). The physics of exceptional points. https://doi.org/10.1088/1751-8113/45/44/444016
[5]. Kawabata, K., Bessho, T. et al. (2019). Classification of Exceptional Points and Non-Hermitian Topological Semimetals, 066405, 1–7. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.066405
[6]. Rüter, C. E., Makris, K. G., et al. (2010). Observation of parity – time symmetry in optics. Nature Physics, 6–9. https://doi.org/10.1038/nphys1515
[7]. Saurabh Mani Tripathi Shalini Kumari, K. K. N. A. (2025). Exceptional Point Dynamics in Photonic Time Crystals for Enhanced Optical Sensing. ArXiv, 1–10. http://arxiv.org/abs/2512.02945v1
[8]. Taravati, S., Kishk, A. et al. (2024). Finite-Difference Time-Domain Simulation of Wave Transmission Through Space-Time-Varying Media, 1–14. http://arxiv.org/abs/2409.19923