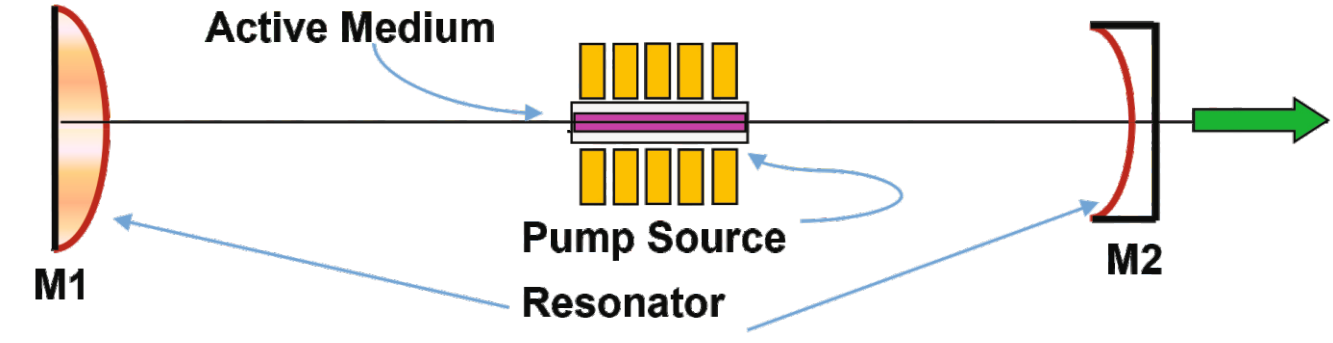
लेसर प्रौद्योगिकी : प्रगति का नया आयाम

परमजीत राणा और विनोद सिंह रावत

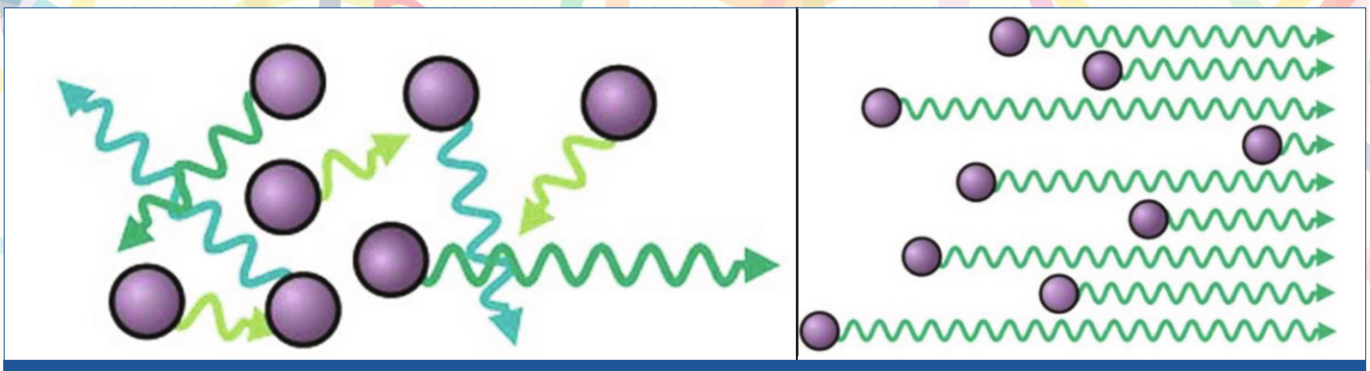
भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

प्रकाश केवल प्रकृति की विविधता और सुन्दरता का दर्शन करने में ही नहीं बल्कि उसे समझने और विश्लेषण करने में भी अहम भूमिका निभाता है। प्रकाश विद्युतचुम्बकीय ऊर्जा है जिसे अलग-अलग वर्गों में विभाजित किया गया है। इसके अनेक प्रकारों में से, एक अति-विशिष्ट प्रकार है, लेसर (LASER)। विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी को उन्नति की ऊंचाइयों पर पहुंचाने में लेसर का योगदान अहम है। लेसर का उपयोग हमारे दैनिक कार्यों में इस्तेमाल होने वाले बार-कोड स्कैनर, सीडी/ डीवीडी (CD/DVD) प्लेयर, पॉइंटर, इत्यादि में हो रहा है। रक्षा-क्षेत्र में इस्तेमाल होने वाले हथियारों से लेकर क्वांटम कम्प्यूटिंग तक, ब्रह्मांडीय गुरुत्वाकर्षण तरंगों के अध्ययन संबंधित वेधशाला (लिगो; LIGO) से लेकर संलयन (फ्यूज़न) तक, एवं लेसर-प्रेरित परमाणु परिवर्तन जैसी उन्नत वैज्ञानिक तकनीकों तक लेसर अपना प्रभाव स्थापित कर चुकी है। प्रस्तुत लेख में, लेसर उपकरणों की विशेषताओं और कुछ अनुप्रयोगों के बारे में संक्षिप्त जानकारी दी गई है।

लेसर का कार्य सिद्धांत - लेसर (LASER) का पूरा नाम 'लाइट एम्पलीफिकेशन बाइ स्टिम्युलेटेड एमिशन ऑफ रेडिएशन' (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) है जिसका हिंदी रूपांतरण 'विकिरण के उद्दीपित उत्सर्जन द्वारा प्रकाश का प्रवर्धन' है। यह एक ऐसी तकनीक है, जिससे प्रकाश की अति-तीव्र, संकरी और सीधी किरण उत्पन्न होती है। यह सामान्य प्रकाश से काफी अलग होती है। किसी लेसर से प्राप्त सभी प्रकाश तरंगों की दिशा, आवृति और कला (Phase) समान होती है। इसका मूल सिद्धान्त यह है कि जब किसी परमाणु को ऊर्जा दी जाती है तो उसके इलेक्ट्रॉन उत्तेजित होकर, उच्च ऊर्जास्तर पर चले जाते हैं। ये इलेक्ट्रॉन प्रकाश कण (फोटॉन) उत्सर्जित करते हुए पुनः निम्न ऊर्जास्तर पर आते हैं। इस प्रक्रिया में, फोटॉन जब किसी उत्तेजित परमाणु से टकराता है तो उद्दीपित उत्सर्जन (स्टिम्युलेटेड एमिशन) के कारण उसी दिशा और कला में एक अन्य फोटॉन उत्पन्न हो जाता है। यह प्रक्रिया जब उत्तेजित परमाणुओं के किसी पदार्थ में बार-बार दोहराई जाती है, तो एक ही तरह के फोटॉनों (प्रकाश कणों) का प्रवर्धन होता है। इसके परिणामस्वरूप, एक शक्तिशाली, केंद्रित, संबद्ध (कोहरेंट) लेसर प्रकाश-पुंज (लाइट-बीम) प्राप्त होता है।



चित्र-1 लेसर का मूल ढांचा (योजनावत)



चित्र - 2 असंबद्ध (नॉन-कोहरेंट) एवं संबद्ध (कोहरेंट) फोटॉन

लेसर के तीन मुख्य घटक होते हैं - सक्रिय/लब्धि माध्यम (active/gain medium), पंप स्रोत (pump source) और प्रकाशीय अनुनादक (optical resonator) । ये मिलकर उद्दीपित उत्सर्जन द्वारा संबद्ध (कोहरेंट) प्रकाश उत्पन्न करते हैं।

लेसर के गुण - लेसर प्रकाश में केवल एक ही तरंगदैर्घ्य (वेवलेंथ) होती है जो इसे एकवर्णीयता (मोनोक्रोमैटिसिटी) प्रदान करती है। लेसर किरणें बहुत कम फैलती हैं, इसलिए बहुत दूर तक सीधी जा सकती है जिसे दैशिकता (डाइरेक्शनालिटी; directionality) कहा जाता है। कला-संबद्धता (phase-coherence) लेसर का सबसे महत्वपूर्ण गुण है जो इसे अन्य सभी प्रकार के प्रकाश स्रोतों से विशिष्ट बनाता है और इसकी उपयोगिता को असाधारण रूप से बढ़ा देता है।

लेसर किरणपुंज की समस्त ऊर्जा को बहुत ही छोटे क्षेत्र में केंद्रित किया जा सकता है, जिसके कारण इसकी तीव्रता को बहुत अधिक मात्रा में बढ़ाया जा सकता है।

लेसर के सामान्य प्रकार - सक्रिय (लब्धि) माध्यम की अवस्था के आधार पर लेसर को चार प्रकारों में बांटा गया है - (1) ठोस-अवस्था (सॉलिड-स्टेट) लेसर जैसे कि Nd:YAG, (2) गैसीय अवस्था लेसर जैसे कि हीलियम-निऑन (He-Ne), (3) अर्धचालक (सेमी-कंडक्टर) लेसर जैसे कि गैलियम आर्सेनाइड (Ga-As), तथा (4) तरल अवस्था लेसर जैसे कि रंजक (डाइ; dye) लेसर । तरंग निरन्तरता के आधार पर लेसर दो प्रकार की होती है - सतत तरंग (कन्टिन्यूअस वेव) और स्पंदित (पल्स्ड) । स्पंदित लेसरों को उनके स्पंद अन्तराल (पल्स ड्यूरेशन) के आधार पर नैनो (10^{-9}), पिको (10^{-12}), फेम्टो (10^{-15}), एट्टो (10^{-18}) सेकंड लेसर के तौर पर जाना जाता है। तरंगदैर्घ्य (वेवलेंथ) की निश्चितता अथवा परिवर्तनीयता के आधार पर लेसर दो प्रकार की - एकवर्णीय (मोनोक्रोमेटिक) एवं समस्वरणीय (ट्यूनेबल) होती है। डाइ लेसर, सॉलिड-स्टेट ट्यूनेबल लेसर (टाइटेनियम-सफायर; Ti-Sapphire), सेमी-कंडक्टर लेसर और प्रकाश प्राचलिक दोलित्र (आप्टिकल पैरामेट्रिक ऑसिलेटर; optical parametric oscillator), इत्यादि समस्वरणीय (ट्यूनेबल) लेसरों के कुछ सामान्य प्रकार हैं।

लेसर के महत्वपूर्ण अनुप्रयोग - ट्यूनेबल लेसर की तरंगदैर्घ्य को सटीक रूप से नियंत्रित किया जा सकता है, जो विभिन्न क्षेत्रों में उनके अनुप्रयोगों के लिए उत्तरदायी है। इसमें दूरसंचार, स्पेक्ट्रमदर्शी, मेडिकल इमेजिंग एवं संवेदन (सेंसिंग) तथा अनेक प्रकार के अनुसंधान एवं विकास शामिल हैं। चिकित्सा के क्षेत्र में लेसर का उपयोग विविध प्रकार की शल्य-चिकित्सा एवं अन्य-उपचारों के लिए किया जाता है, जिनमें आंखों की शल्य-चिकित्सा (सर्जरी), दंत-चिकित्सा, त्वचा-देखभाल एवं कैंसर-उपचार महत्त्वपूर्ण हैं।

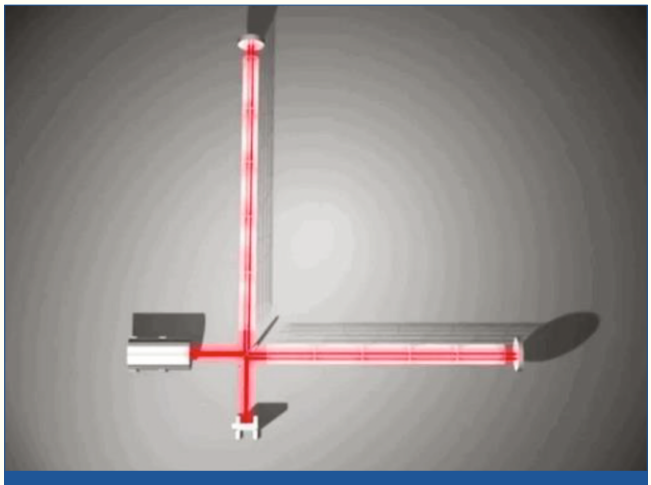
उद्योगों में भी लेसर का उपयोग सटीक और कुशल प्रक्रियाओं के क्रियान्वयन में किया जाता है। लेसर किरणों की ऊर्जा को अति-सूक्ष्मबिंदु पर केंद्रित कर पाने की क्षमता

के कारण, धातुओं, गैर-धातुओं की वेल्डिंग, कटिंग, ड्रिलिंग, मार्किंग, इत्यादि बड़ी आसानी से की जा सकती है। सुपरमार्केट में उत्पादों के बारकोड स्कैनर, लेसर पॉइंटर, पर्यटक स्थलों पर लेसर लाईट शो, इत्यादि अनुप्रयोग सामान्य जन-जीवन में लेसर की उपयोगिता को दर्शाते हैं।

कुछ प्रमुख, प्रभावशाली एवं प्रगतिशील लेसर प्रौद्योगिकियों के वैश्विक उपयोग, जो विज्ञान और तकनीकी विकास में क्रांतिकारी बदलाव ला रहे हैं, की चर्चा भी आवश्यक है। लेसर किरणों में निहित अथाह ऊर्जा को केंद्रित करके चरम शक्ति घनत्व (peak power density) प्राप्त किया जा सकता है जिसका उपयोग नाभिकीय संलयन (न्यूक्लियर फ्यूज़न) में किया जाता है। लेसर फ्यूज़न को जड़त्वीय परिसीमन संलयन (इनर्शियल कन्फ़ाइनमेंट फ्यूज़न; inertial confinement fusion (ICF)) भी कहा जाता है। इसका लक्ष्य नाभिकीय ऊर्जा को एक स्वच्छ, सुरक्षित और लगभग असीमित स्रोत बनाना है। इस प्रक्रिया में ड्यूटिरियम (2D) और ट्रिशियम (3T) युक्त गुटिका (पेलेट) पर अति-ऊर्जित किरणों को आपतित किया जाता है, जिससे गुटिका (पेलेट) की बाहरी परत वाष्पीकृत हो जाती है और इसके अंदर का भाग सूर्य के समान उच्च दाब एवं तापमान अवस्था का सामना कर पाता है।

इन परिस्थितियों में ड्यूटीरियम एवं ट्रिशियम के नाभिक संलयित हो जाते हैं और भारी मात्रा में ऊर्जा मुक्त होती है जिसका विभिन्न प्रकार से उपयोग किया जा सकता है। वर्ष 2022 में, संयुक्त राज्य अमेरिका की राष्ट्रीय इग्निशन सुविधा (NIF) में पहली बार लेसर संलयन (लेसर फ्यूज़न) संभव हो पाया, जिसे इस क्षेत्र में बड़ी सफलता माना जाता है।

लेसर तरंगों के संबद्ध (कोहरेंट) होने के कारण, व्यतिकरण (इंटरफेरेंस) पर आधारित अनुप्रयोगो में भी इसका उपयोग किया जाता है। लेसर इंटरफेरोमीटर गुरुत्वीय-तरंग वेधशाला (लेसर इंटरफेरोमीटर ग्रेविटेशनल-वेव ऑब्जर्वेटरी, जिसे LIGO भी कहा जाता है) इसका एक महत्त्वपूर्ण उदाहरण है, जिसके द्वारा ब्रह्मांड में मौजूद गुरुत्वाकर्षण तरंगों का पता लगाया जा सकता है। इसमें एक संवेदनशील लेसर इंटरफेरोमीटर का उपयोग करके अंतरिक्ष समय (स्पेस टाइम) में होने वाले सूक्ष्म परिवर्तनों को मापा जाता है। जब एक गुरुत्वाकर्षण तरंग पृथ्वी से होकर गुज़रती है तो वह स्पेस को थोड़ा खींचती और सिकोड़ती है जिससे वेधशाला (ऑब्जर्वेटरी) में लगे उपकरणों में बहुत ही मामूली बदलाव होते हैं, जिन्हें संसूचक (डिटेक्टर) माप लेते हैं। इस वेधशाला (ऑब्जर्वेटरी) में माइकलसन व्यतिकरणमापी (माइकलसन इंटरफेरोमीटर) को 4 किलोमीटर लंबी दो भुजाओं में स्थापित किया गया है। जब अति-संबद्ध लेसर किरणें इन भुजाओं के अन्त में स्थित दर्पणों से टकरा कर पुनः एक बिन्दु पर मिलती हैं तो एक इंटरफेरेंस पैटर्न का निर्माण होता है। गुरुत्वाकर्षण तरंग की मौजूदगी इस पैटर्न में हुए बदलाव के कारण ही डिटेक्ट की जा सकती है।



चित्र-3 लेसर इंटरफेरोमीटर गुरुत्वीय तरंग वेधशाला

[https://www.ligo-india.in/outreach/ detecting-gravitational-waves/]

क्वांटम कम्प्यूटिंग के क्षेत्र में भी समस्वरणीय (ट्यूनेबल) लेसर का उपयोग क्वांटम बिट्स अर्थात क्युबिट्स (Qubits) को नियंत्रित और परिवर्तित करने के लिए किया जाता है। ट्यूनेबल लेसर के उपयोग से आयन पाश (आयन ट्रैप) और परमाणु पाश (एटम ट्रैप) जैसी परिस्थितियां उत्पन्न करके क्युबिट्स का निर्माण एवं नियंत्रण किया जाता है।

ट्यूनेबल लेसर का अनुप्रयोग समस्थानिकों के संवर्धन में भी किया जाता है। समस्थानिकीय समृद्ध पदार्थों को नाभिकीय रिएक्टर में तत्वान्तरित (परिवर्तित) करके, प्राप्त उत्पादों का कैंसर के निदान और उपचार में इस्तेमाल किया जा रहा है, जिससे सामाजिक कल्याण में भी योगदान मिल रहा है।

आधुनिक लेसर किरणों की शीर्ष शक्ति (पीक पावर) पेटावाट (10^{15} वाट) तक और स्पन्द अंतराल (पल्स ड्यूरेशन) एट्टोसेकंड (10^{-18} सेकंड) तक पहुँच चुकी है। लेसर-आधारित तकनीकें विज्ञान के विभिन्न क्षेत्रों में नए आयाम स्थापित करते हुए क्रांतिकारी बदलाव ला रही है।

लेसर के अनुप्रयोग निरंतर बढ़ रहे हैं। परमाणु ऊर्जा विभाग की विभिन्न इकाइयों जैसे भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई और राजा रमन्ना प्रगत प्रौधोगिकी केंद्र, इंदौर में लेसर के विकास एवं उन्नत अनुप्रयोगों पर तीव्र गति से कार्य हो रहा है। इन संस्थानों में कार्यरत वैज्ञानिक उन्नत लेसर के विकास और इनके अनुप्रयोगों के माध्यम से वैश्विक स्तर पर देश के विकास और जन-कल्याण हेतु निरंतर प्रयासरत हैं।

आभार

लेखकद्वय, इस लेख की संरचना में प्रत्यक्ष एवं परोक्ष रूप से सहयोग एवं मार्गदर्शन देने वाले सभी व्यक्तियों विशेषकर श्री मार्टिन मास्करेन्हस, निदेशक, किरणपुंज विकास वर्ग, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रति हार्दिक आभार प्रकट करते हैं।

लेखकगण का परिचय

परमजीत राणा

डॉ. परमजीत राणा, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रगत ट्यूनेबल लेसर अनुप्रयोग प्रभाग (ATLAD) में वैज्ञानिक अधिकारी-जी के पद पर कार्यरत हैं।

विनोद सिंह रावत

डॉ. विनोद सिंह रावत, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रगत ट्यूनेबल लेसर अनुप्रयोग प्रभाग (ATLAD) में वैज्ञानिक अधिकारी-एच के पद पर कार्यरत हैं।

"मेरी सफलता इस बात पर निर्भर नहीं करेगी कि कोई मेरे बारे में क्या सोचता है..."

- डॉ. होमी जहांगीर भाभा