प्रौद्योगिकी विशेष

डीआरडीओ की संस्थागत
एस एण्ड टी पत्रिका

www.drdo.gov.in

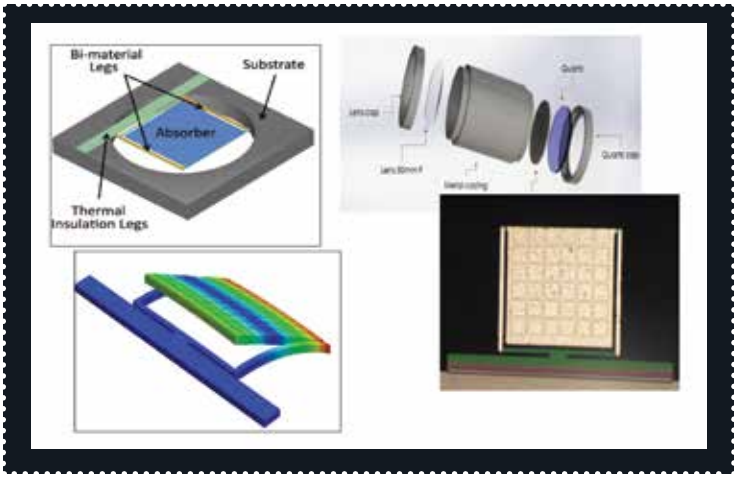
खंड 11 अंक 3, मई–जून 2023 | डीआरडीओ की द्विमासिक पत्रिका | ISSN: 2319-5568

उन्नत अर्द्धचालक उपकरण प्रौद्योगिकिया

प्रौद्योगिकी विशेष डीआरडीओ द्वारा विकसित किए गए उत्पादों, प्रक्रमों एवं प्रौद्योगिकियों को शामिल करते हुए इस संगठन द्वारा प्रौद्योगिकीय विकास के क्षेत्र में प्राप्त की गई उपलब्धियों को पाठकों के समक्ष प्रस्तुत करता है।

मई–जून 2023
खंड 11, अंक 3

संरक्षक: डॉ के नागेश्वर राव
मुख्य संपादक: सुधांशु भूषण
संपादक: दीप्ति अरोडा
सहायक संपादक: धर्म वीर
अनुवादक: सुनील कुमार दुबे



पाठकगण कृपया अपने सुझाव निम्नलिखित पते पर भेजें

संपादक, प्रौद्योगिकी विशेष

रक्षा वैज्ञानिक सूचना तथा प्रलेखन केंद्र (डेसीडॉक)
मेटकाफ हाउस, दिल्ली–110054
टेलीफोन : 011–23902403, 23902434
फैक्स : 011–23819151, 011–23813465
ई–मेल : director.desidoc@gov.in; techfocus.desidoc@gov.in; technologyfocus@desidoc.deldom
इंटरनेट : www.drdo.gov.in/prodhyogic-vishesh

स्थानीय संवाददाता

आगरा :	श्री एस एम जैन, एडीआरडीई
अहमदनगर :	कर्नल अतुल आप्टे, श्री आर ए शेख, वीआरडीई
अंबरनाथ :	डॉ गणेश एस ढोले, एनएमआरएल
बेंगलूरू :	श्री सतपाल सिंह तोमर, एडीई श्रीमती एम आर भुवनेश्वरी, कैब्स श्रीमती ए जी जे फहीमा, केयर श्री आर कमलाकन्नण, सेमीलेक डॉ संचिता सिल एवं डॉ सुधीर एस काम्बलम, डेबेल डॉ वी सेंथिल, जीटीआरई डॉ सुशांत क्षत्रे, एमटीआरडीसी
चंडीगढ़ :	डॉ पाल दिनेश कुमार, टीबीआरएल डॉ अनुजा कुमारी, डीजीआरई
चेन्नई :	श्री के अंबाझगन, सीवीआरडीई
देहरादून :	श्री अभय मिश्रा, डील डॉ एस के मिश्रा, आईआरडीई
दिल्ली :	श्री सुमित कुमार, सीफीस डॉ दीप्ति प्रसाद, डिपास श्री संतोष कुमार चौधरी, डीआईपीआर श्री नवीन सोनी, इनमास श्री अनुराग पाठक, ईसा डॉ रुपेश कुमार चौबे, एसएसपीएल
ग्वालियर :	डॉ ए के गोयल, डीआरडीई
हल्दवानी :	डॉ अतुल ग्रोवर, डिबेर डॉ रंजीत सिंह
हैदराबाद :	श्री ए आर सी मूर्ति, डीएलआरएल डॉ मनोज कुमार जैन, डीएमआरएल
जोधपुर :	श्री डी के त्रिपाठी, डीएल
कानपुर :	डॉ मोहित कटियार, डीएमएसआरडीई
कोच्चि :	सुश्री लीथा एम एम, एनपीओएल
लेह :	डॉ शेरिंग स्टोब्डन, डिहार
पुणे :	डॉ गणेश शंकर डोम्बे, एचईएमआरएल श्री अजय कुमार पांडेय, एआरडीई डॉ अनूप आनंद, अनुसंधान तथा विकास स्थापना (इंजी.)
तेजपुर :	डॉ एस एन दत्ता, डीआरएल
मैसूर :	डॉ एम पालमुरूगन, डीएफआरएल

अतिथि संपादक की कलम से

अर्द्धचालक सामग्रियों से निर्मित माइक्रोइलेक्ट्रॉनिक घटक जिन्हें माइक्रोइलेक्ट्रॉनिक अर्द्धचालक उपकरण कहा जाता है, रणनीतिक प्रणालियों के निर्माण खंड हैं। ठोसावस्था भौतिकी प्रयोगशाला (एसएसपीएल), दिल्ली भारत से वंचित महत्वपूर्ण अर्द्धचालक उपकरण प्रौद्योगिकियों को विकसित करने के लिए अपनी विशेषज्ञता का उपयोग करती है।

प्रौद्योगिकी विशेष का यह अंक अर्थात् 'उन्नत अर्द्धचालक उपकरण प्रौद्योगिकियां' पिछले अंक 'उन्नत अर्द्धचालक सामग्री प्रौद्योगिकियां' की अगली कड़ी है और इसमें विद्युत चुम्बकीय स्पेक्ट्रम के एमएमडब्ल्यू, आईआर, दृश्यमान और टीएचजेड क्षेत्रों के लिए एसएसपीएल में विकसित उपकरण प्रौद्योगिकियों को शामिल किया गया है।

एसएसपीएल में विभिन्न यौगिक अर्द्धचालक प्रौद्योगिकियों के स्वदेशी विकास में रडार, इलेक्ट्रॉनिक वारफेयर, जैमर, ईएम सीकर्स और रिमोट इमेजर्स में अनुप्रयोग के लिए गैलियम नाइट्राइड (GaN) आधारित मोनोलिथिक माइक्रोवेव इंटीग्रेटेड सर्किट (एमएमआईसी) शामिल हैं। निर्मित एमएमआईसी में स्वदेशी गैलियम नाइट्राइड तकनीक पर आधारित पावर एम्पलीफायर (पीए), कम शोर वाले एम्पलीफायर (एलएनए), सिंगल पोल डबल थ्रो स्विच (एसपीडीटी) और ट्रांसरिसीवर चिप्स शामिल हैं। इन उत्पादों के लिए उपयोग की जाने वाली एपिटैक्सियल सामग्री भी एसएसपीएल में विकसित की गई है। गैलियम नाइट्राइड और गैलियम आर्सेनाइड (GaAs) प्रौद्योगिकियों पर आधारित सिंगल एमिटर अर्द्धचालक लेजर डायोड भी निर्देशित ऊर्जा हथियार (डीईडब्ल्यु), विस्फोटक विस्फोट और अंतर्जलीय संचार के लिए सीड लेजर के रूप में उपयोग के लिए स्वदेशी रूप से विकसित किए गए हैं।

गैटेक (GAETEC) में उत्पादन के लिए गैलियम नाइट्राइड एमएमआईसी, गैलियम आर्सेनाइड और गैलियम नाइट्राइड–आधारित लेजर डायोड की स्वदेशी तकनीकें स्थापित की गई हैं। आईआर सेंसर शॉर्ट वेव आईआर (एसडब्ल्यूआईआर), मीडियम वेव आईआर (एमडब्ल्यूआईआर), और लॉन्ग वेव आईआर (एलडब्ल्यूआईआर) पर आधारित आईआर इमेजर्स का हृदय है। जैसा कि पिछले अंक में बताया गया था, एसएसपीएल ने आईआर सामग्री विकास में आत्मनिर्भरता हासिल की है जबकि आईआर छवियों के लिए अग्रणी सभी परिधीय प्रौद्योगिकियां पहले से ही उत्पादन में हैं, एमसीटी, टी2एसएल और एसआई एमईएमएस पर आधारित आईआर सेंसर तकनीक परिपक्व हो गई है। सेंसरों को रखने के लिए देवार और

क्रायोजेनिक तापमान पर देवार को बनाए रखने के लिए स्टर्लिंग कूलर को उत्पादन में स्थानांतरित कर दिया गया है। एससीएल, चंडीगढ़ में एसआई रीड आउट इंटीग्रेटेड सर्किट (आरओआईसी) का उत्पादन चल रहा है।

सुरक्षित और सैन्य उपकरणों, सीबीआरएन और हिम हिमस्खलन की भविष्यवाणी के लिए सेंसर विकसित किए गए हैं और उत्पादन के लिए उद्योगों में स्थानांतरित कर दिए गए हैं। क्वांटम और टीएचजेड उभरती हुई प्रौद्योगिकियां हैं जिन्हें एसएसपीएल में सेंसर, इमेजिंग और कंप्यूटिंग में भविष्य के अनुप्रयोगों के लिए भी अपनाया जा रहा है। गैटेक और स्टार्क पायलट उत्पादन एफएबी फाउंड्री हैं जो न केवल एसएसपीएल में विकसित प्रौद्योगिकियों को अवशोषित करते हैं बल्कि स्थापना निरीक्षण में एसएसपीएल के साथ एक प्रतीकात्मक साझेदारी भी रखते हैं।

पाठकों की आसान समझ के लिए, यह अंक निर्माण प्रक्रियाओं सहित सरल शब्दों में उपकरण अवधारणाओं पर ध्यान केंद्रित कर रहा है। एसएसपीएल द्वारा विकसित उपकरणों और सर्किटों को पहले ही विभिन्न रक्षा और अंतरिक्ष अभियानों में सफलतापूर्वक लागू किया जा चुका है। मुझे यकीन है कि यह अंक पाठकों को आवश्यक महत्वपूर्ण अर्द्धचालक उपकरण प्रौद्योगिकियों के उभरते रुझानों और भविष्य की दिशाओं के बारे में नवीनतम जानकारी प्राप्त करने की अनुमति देगा। प्रत्येक अनुभाग में मुख्य लेख अत्याधुनिक इनहाउस परिणामों की स्नैप–शॉट और मिनी समीक्षा प्रस्तुत करते हैं, जिससे यह मुद्दा उन्नत और भविष्य की उपकरण प्रौद्योगिकियों के विकास पर काम करने वाले इंजीनियरों, वैज्ञानिकों और छात्रों के द्वारा अवश्य पढ़ा जाना चाहिए।

डॉ सीमा विनायक
उत्कृष्ट वैज्ञानिक एवं निदेशक, एसएसपीएल

उन्नत अर्द्धचालक उपकरण प्रौद्योगिकियाँ

सामग्री से किसी विशिष्ट अनुप्रयोग के अंतर को पाटने के लिए अर्द्धचालक उपकरण आवश्यक घटक हैं। ठोसावस्था भौतिकी प्रयोगशाला (एसएसपीएल) नागरिक /रक्षा अनुप्रयोगों के लिए महत्वपूर्ण विभिन्न उपकरण प्रौद्योगिकियों पर काम करती है। मुख्य फोकस आरएफ, फोटोनिक्स और आईआर डिटेक्टर अनुप्रयोगों के लिए कंपाउंड अर्द्धचालक उपकरण प्रौद्योगिकियों पर मजबूत फोकस के साथ अभिनव उपकरण समाधान विकसित करना है। इसमें गैलियम आर्सेनाइड, गैलियम नाइट्राइड, और मरकरी कैडमियम टेलुराइड जैसी अर्द्धचालक सामग्रियों और देशों की रणनीतिक आवश्यकताओं के लिए महत्वपूर्ण नए और अधिक शक्तिशाली अनुप्रयोगों की दिशा में 'प्रौद्योगिकी–पुश' प्रदान करने वाली संबंधित सामग्रियों पर उपन्यास उपकरण अवधारणाएं शामिल हैं।

एसएसपीएल गैलियम आर्सेनाइड/गैलियम नाइट्राइड हाई इलेक्ट्रॉन मोबिलिटी ट्रांजिस्टर (एचईएमटी) आधारित माइक्रोवेव मोनोलिथिक इंटीग्रेटेड सर्किट (एमएमआईसी), लेजर डायोड और एसडब्ल्यूआईआईआर/एमडब्ल्यूआईआर फोकल प्लेन एरेज (एफपीए) अभिकल्पन/विकास और विशिष्ट अनुप्रयोगों के साथ–साथ उन्नत भविष्यगत अर्द्धचालक उपकरण के एकीकरण की गतिविधियों को कवर करता है।

एसएसपीएल द्वारा विकसित उपकरण और सर्किट विभिन्न रक्षा और अंतरिक्ष अभियानों में कार्यान्वित किए जाते हैं। एसएसपीएल अर्द्धचालक उपकरण प्रौद्योगिकियों पर अनुसंधान एवं विकास पर विशेष ध्यान देता है जो बाहर से आसानी से उपलब्ध नहीं हैं और रणनीतिक घरेलू आवश्यकताओं को पूरा करने के लिए आवश्यक हैं। यह अध्याय मुख्य रूप से गैलियम आर्सेनाइड MESFET/एचईएमटी–आधारित एमएमआईसी, गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी–आधारित एमएमआईसी, लेजर डायोड और इण्डियम गैलियम आर्सेनाइड गैरशीत/मरकरी कैडमियम टेलुराइड शीत आईआर एफपीए से कवर होने वाली इन–हाउस विकसित निर्माण प्रक्रियाओं सहित उपकरण प्रौद्योगिकियों पर केंद्रित है।

स्वदेशी गैलियम नाइट्राइड एमएमआईसी प्रौद्योगिकी

गैलियम नाइट्राइड (GaN)–आधारित हाई इलेक्ट्रॉन मोबिलिटी ट्रांजिस्टर (एचईएमटी) तकनीक आधुनिक रक्षा आरएफ और इलेक्ट्रॉनिक युद्ध प्रणालियों में क्रांति ला रही है। यह तकनीक उच्च आवृत्ति पर उच्च रैखिकता और उच्च दक्षता के साथ उच्च शक्ति प्रदान करने की क्षमता रखती है। इन लाभों के कारण, इसे रडार, उपग्रह संचार और भु–सैन्य संचार जैसे विभिन्न प्रकार के अनुप्रयोगों में उपयोग किया जा रहा है। गैलियम नाइट्राइड–आधारित एचईएमटी तकनीक विशेष रूप से आरएफ चालित अनुप्रयोगों के लिए मौजूदा गैलियम आर्सेनाइड (GaAs) मोनोलिथिक माइक्रोवेव इंटीग्रेटेड सर्किट (एमएमआईसी) पर महत्वपूर्ण लाभ प्रदान करती है। यह मुख्य रूप से गैलियम नाइट्राइड उपकरणों से जुड़े बहुत उच्च ब्रेकडाउन क्षेत्रों के कारण उच्च वोल्टेज पर काम करने की क्षमता के कारण है। इसके अतिरिक्त, गैलियम नाइट्राइड उपकरण बहुत अधिक अवरोध प्रदान करते हैं जिसके परिणामस्वरूप आरएफ पावर एम्पलीफायर एकीकृत सर्किट में कम जटिल मिलान नेटवर्क की आवश्यकता होती है। कुल मिलाकर, गैलियम नाइट्राइड तकनीक प्रतिस्पर्धी आरएफ प्रौद्योगिकियों की तुलना में आरएफ आईसी के आकार को दस गुना या उससे भी अधिक कम कर देती है। इसके अलावा, उच्च दक्षता के साथ कम वर्तमान संचालन से विद्युत की बचत होती है और सिस्टम को ठंडा करने की लागत कम हो जाती है। इसलिए गैलियम नाइट्राइड–आधारित पावर एम्पलीफायर सक्रिय इलेक्ट्रॉनिक रूप से स्कैन किए गए एरे (एईएसए) रडार और संचार प्रणालियों में वर्तमान ट्रांसीवर (टी/आर) मॉड्यूल का हृदय कहलाते हैं।

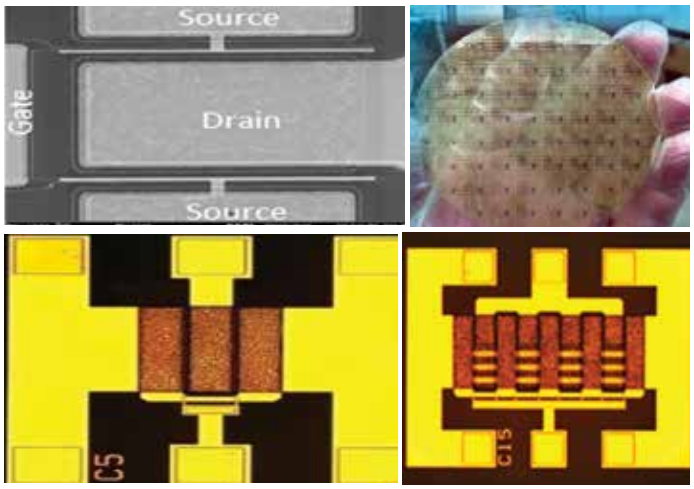
एसएसपीएल ने आरएफ अनुप्रयोगों के लिए गैलियम नाइट्राइड–आधारित सामग्री, उच्च शक्ति उपकरणों और एमएमआईसी में दीर्घकालिक आत्मनिर्भरता प्राप्त करने के लिए स्वदेशी एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड/गैलियम नाइट्राइड पावर एचईएमटी सामग्री और उपकरण निर्माण तकनीक विकसित की है। इसमें (i) एपि–वेफर ग्रोथ (ii) उपकरण सिमुलेशन (iii) उपकरण निर्माण, और (iv) डीसी, आरएफ और उच्च शक्ति उपकरणों के लोड पुल माप के लिए प्रक्रिया नियंत्रण और लक्षण वर्णन पद्धतियों का विकास शामिल था। निरंतर सीखने की प्रक्रिया और समझ में वृद्धिशील सुधार के आधार पर प्रक्रिया परिपक्वता के लिए, 50V ड्रेन बायस तक संचालन क्षमता और एस/सी बैंड, में ~10 वाट/मिमी

की पावर घनत्व, एक्स बैंड में 5 वाट/मिमी के साथ ह्रास मोड में एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड/गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी का सफल प्रदर्शन प्राप्त कर लिया है। हाल ही में, एसएसपीएल ने Ku बैंड पर 3.5 वाट/मिमी पावर घनत्व वाले एचईएमटी उपकरणों का भी प्रदर्शन किया।

स्वदेशी प्रक्रिया के आधार पर, एसएसपीएल ने एक्स–बैंड तक काम करने वाले एमएमआईसी को अभिकल्पन करने के लिए गैलियम नाइट्राइड पीडीके विकसित और जारी किया। इस पीडीके का उपयोग 130 डब्ल्यू एस–बैंड उच्च शक्ति उपकरणों के साथ–साथ गैलियम नाइट्राइड एमएमआईसी जैसे सी, और एक्स–बैंड पावर एम्पलीफायरों, कम शोर एम्पलीफायरों और स्विच सर्किट सहित उच्च शक्ति असतत बार को अभिकल्पन करने के लिए किया गया है।

गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी उपकरण प्रक्रिया प्रौद्योगिकी

एचईएमटी निर्माण में बड़ी संख्या में इकाई प्रक्रियाएं शामिल हैं जिन्हें वांछित विश्वसनीय पुनरुत्पादनीय क्षमता के साथ उपकरण को साकार करने के लिए एकीकृत करने की आवश्यकता है। एसएसपीएल ने एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड/गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी के निर्माण के लिए आवश्यक सभी प्रक्रियाएं विकसित की हैं, अर्थात् ओमिक और स्कॉटी संपर्क, सतह निष्क्रियता, ई–बीम लिथोग्राफी, उपकरण अलगाव और गेट स्लिट नक्काशी के लिए आरआईई, इम्प्लांट अलगाव, लिफ्ट–ऑफ और इलेक्ट्रोप्लेटिंग द्वारा इंटर–कनेक्ट गठन। क्रमशः 26 गीगाहर्ट्ज और 34 गीगाहर्ट्ज की कट–ऑफ आवृत्तियों के साथ 0.4 μm और 0.25 μm की गेट लंबाई वाले उपकरणों का निर्माण किया गया है। किसी विशेष गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी के अधिकतम प्रदर्शन को प्राप्त करने के लिए, जो विशेषताएं अधिकतम महत्व रखती हैं वे हैं उच्च ऑफ–स्टेट ब्रेकडाउन वोल्टेज, वर्तमान पतन दमन, कम गेट और बफर रिसाव और कम अवस्था प्रतिरोध। सिमुलेशन, प्रक्रिया प्रौद्योगिकी विकास और लक्षण वर्णन के माध्यम से इन सुविधाओं का अनुकूलन एसएसपीएल में हासिल किया गया है। प्रक्रियाओं को एमओसीवीडी और एमबीई द्वारा स्वदेशी रूप से विकसित सामग्री के साथ–साथ आयातित सामग्री पर भी एकीकृत किया गया है। मुख्य प्रौद्योगिकी सफलताओं में ब्रेकडाउन वोल्टेज पर नियंत्रण और उपकरण की सतह निष्क्रियता के बाद घुटनों का कम चलना शामिल है। उपकरण ब्रेकडाउन वोल्टेज में सुधार के लिए गेटों पर फील्ड प्लेटें शामिल की गई हैं। प्रौद्योगिकी का सिलिकॉन कार्बाइड सबस्ट्रेट्स पर



चित्र 1. 75 मिमी SiC सबस्ट्रेट्स पर GaN/AlGaN पर एसएसपीएल में निर्मित उपकरण

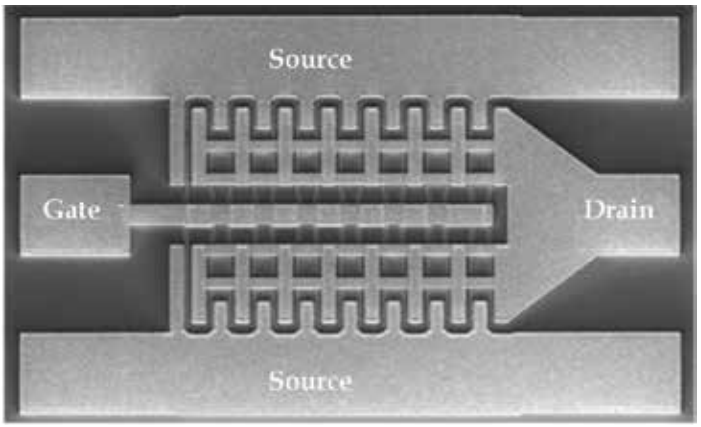
75 मिमी एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड/गैलियम नाइट्राइड पर विकसित किया गया है (चित्र 1)।

1 ए/मिमी पीक ड्रेन करंट घनत्व, 230 एमएस/मिमी का डीसी ट्रांस–कंडक्टेंस और 5.0–6.0 वाट/मिमी से एक्स–बैंड तक एक्सट्रापोलेटेड पावर आउटपुट के साथ ह्रास मोड एचईएमटी उपकरण 28 वोल्ट ऑपरेशन पर हासिल किए गए हैं। मुख्य प्रक्रिया पैरामीटर तालिका 1 में दिखाई गई है।

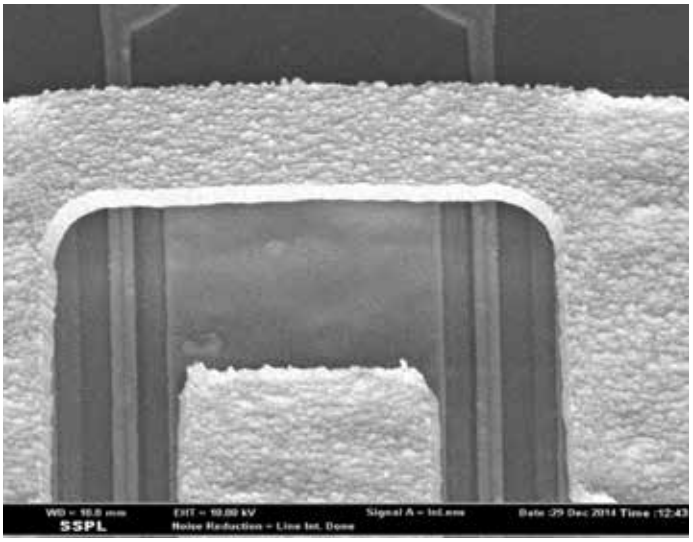
तालिका 1. प्रक्रिया पैरामीटर

इकाई प्रक्रिया	प्राप्त परिणाम
आरआईई द्वारा मेसा अलगाव/मेसा से मेसा रिसाव के साथ प्रत्यारोपण अलगाव	~40 nA@ 100 V
एफओएम के साथ दोहराए जाने योग्य ओमिक संपर्क	0.3-0.6 ohm-mm
दोहराए जाने योग्य V_f के साथ स्कॉटकी संपर्क	0.9-1.2 V@ 1 mA/mm
रिवर्स स्कॉटकी ब्रेकडाउन	-80 V @ 1 mA/mm
PECVD और ICPCVD द्वारा भूतल निष्क्रियता	न्यूनतम नी वॉकआउट। न्यूनतम धारा पतन

7.2 मिमी की गेट चौड़ाई वाले पैकेज्ड उपकरण को 3 गीगाहर्ट्ज पर एस–बैंड में 30 वाट की संतृप्त आउटपुट पावर के साथ मापा गया है। इन–हाउस विकसित बायस टी ने बड़े परिधि उपकरणों के ऑन–वेफर लोड पुल माप को सक्षम किया है। मछली की हड्डी के विन्यास वाले 3 मिमी उपकरणों को 15 वाट (चित्र 2) की संतृप्त आउटपुट पावर के साथ वेफर मोड में मापा जा सकता है।



चित्र 2 (ए). SiC पर GaN/AlGaN हेटरोस्ट्रक्चर पर एसएसपीएल में निर्मित 30 फिंगर 3 मिमी GaN HEMT डिवाइस की FESEM छवि



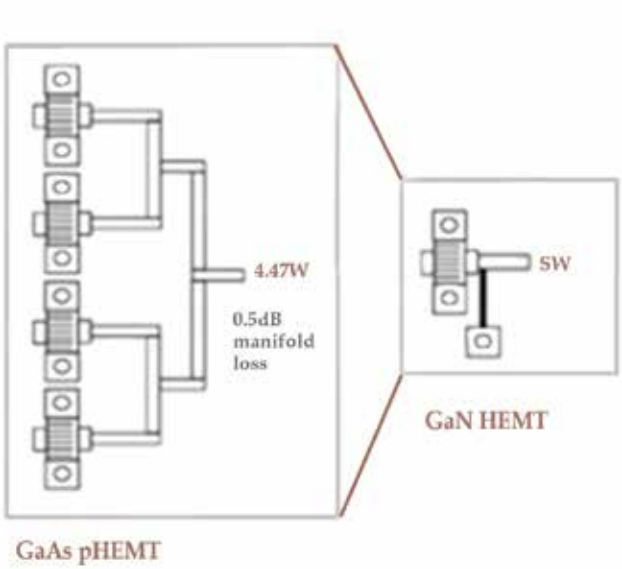
चित्र 2 (बी). GaN HEMT डिवाइस सब्सट्रेट में दो स्रोत पैड के बीच एयर-ब्रिज कनेक्शन की FESEM छवि

समवर्ती रूप से, गैलियम नाइट्राइड उत्पादों के लिए उत्पादन सुविधा बनाने के लिए गैटेक, हैदराबाद में गैलियम नाइट्राइड उपकरण निर्माण तकनीक लागू की जा रही है, जिससे देश गैलियम नाइट्राइड एमएमआईसी तकनीक में आत्मनिर्भर हो जाएगा।

अगली पीढ़ी के आरएफ प्रणाली के लिए एमएमआईसी-सक्षम प्रौद्योगिकी

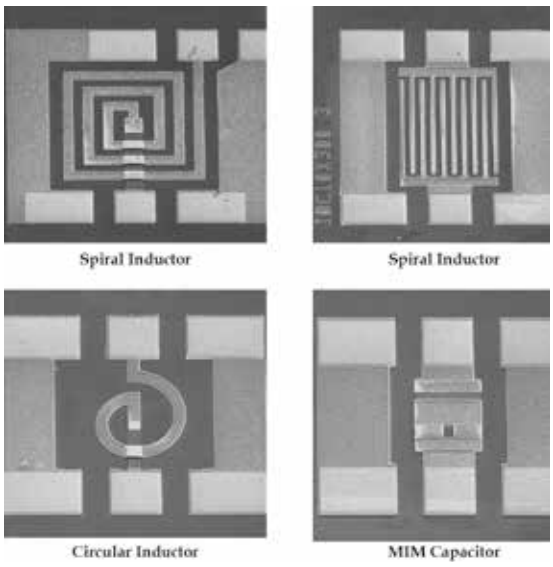
गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी को या तो हाइब्रिड आरएफ माइक्रोवेव इंटीग्रेटेड सर्किट (एमआईसी) मॉड्यूल में असतत सक्रिय उपकरणों के रूप में या एमएमआईसी बनाने के लिए एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइडध गैलियम नाइट्राइड वेफर पर अन्य निष्क्रिय तत्वों के साथ संयोजन में उपयोग किया जा सकता है। (चित्र 3)

एसएसपीएल ने स्वदेशी गैलियम नाइट्राइड–आधारित



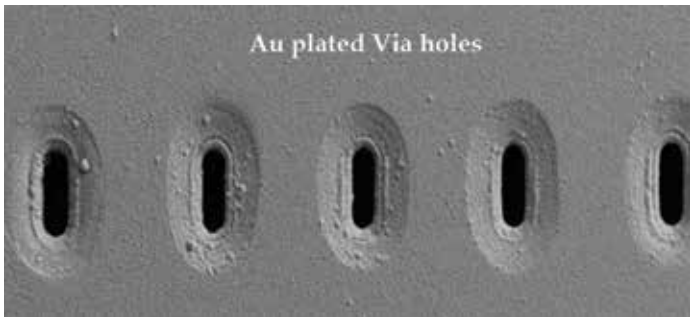
चित्र 3. GaAs बनाम GaN में समान शक्ति के लिए डिवाइस ज्यामिति की तुलना

एमएमआईसी तकनीक का प्रदर्शन किया है और पावर एम्पलीफायरों, कम शोर वाले एम्पलीफायरों और एक्स–बैंड तक के अनुप्रयोगों के साथ आरएफ स्विच सहित गैलियम नाइट्राइड–आधारित एमएमआईसी विकसित किया है। अभिकल्पन करने में एक महत्वपूर्ण कदम के रूप में गैलियम नाइट्राइड–आधारित एमएमआईसी निष्क्रिय घटकों (प्रेरकत्व, संधारित्र, गैलियम नाइट्राइड, और निकिल क्रोमियम प्रतिरोधक) का एक पुस्तकालय है और सक्रिय घटकों को अभिकल्पन और मॉडलिंग किया गया है। एसएसपीएल ने एमएमआईसी प्राप्ति के लिए सक्रिय उपकरणों के साथ निष्क्रिय घटकों के निर्माण को एकीकृत करने की पूरी प्रक्रिया तैयार की है और एक्स–बैंड तक पीए, एलएनए और स्विच एमएमआईसी का प्रदर्शन किया है। (चित्र 4)



चित्र 4. एयर ब्रिज प्रौद्योगिकी के साथ निर्मित निष्क्रिय घटकों की FESEM छवि

माइक्रोवेव आवृत्तियों पर एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड/गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी उपकरणों के लिए वाया–होल इंटरकनेक्शन तकनीक बहुत महत्वपूर्ण है। ये संरचनाएं उच्च आवृत्तियों पर पैरासाईटिक कमी में मदद करती हैं। एसएसपीएल ने इन–हाउस वाया–होल तकनीक विकसित की है और सोर्स ग्राउंडिंग के लिए सिलिकॉन कार्बाइड सब्सट्रेट पर एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड/गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी–आधारित उपकरणों/एमएमआईसी में लागू की है। वाया सोर्स ग्राउंड के साथ निर्मित उपकरण की पिछली तरफ की छवि चित्र 5 में दिखाई गई है। सभी सक्रिय और निष्क्रिय घटकों को वाया के साथ निर्मित किया गया है।

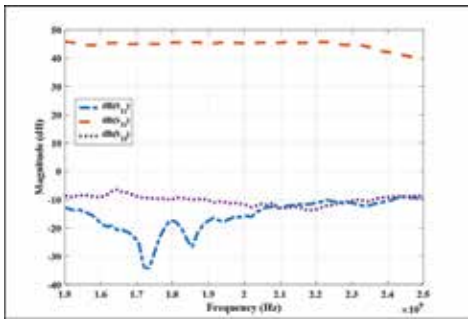


चित्र 5. GaN HEMT पर निर्मित बैक-साइड वाया-होल की FESEM छवि

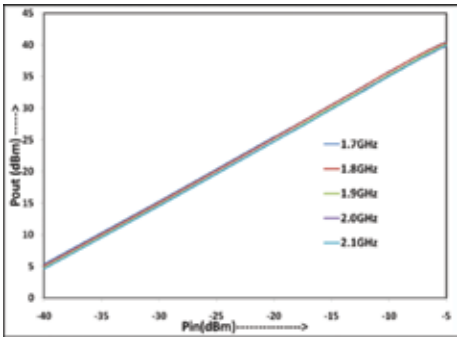
गैलियम नाइट्राइड हाई पावर मॉड्यूल

स्वदेशी रूप से निर्मित गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी उपकरणों का उपयोग करके एसएसपीएल में 1.7–2.1 GHz की आवृत्ति रेंज के लिए एक CW रैखिक 10 वाट एमआईसी पावर एम्पलीफायर मॉड्यूल डिजाइन किया गया है। पावर एम्पलीफायर ने 45 डीबी के छोटे सिग्नल लाभ और 35 डीबीसी से बेहतर तीसरे क्रम के आईएमडी का प्रदर्शन किया है। पीए मॉड्यूल की असेंबली गैटेक में की गई है। यह कार्य पूर्ण स्वदेशीकरण की दिशा में एक कदम है। मॉड्यूल फोटोग्राफ चित्र 6 में दिखाया गया है। विकसित पीए मॉड्यूल का मापा गया आरएफ निष्पादन चित्र 7 (ए) और चित्र 7 (बी) में दिखाया गया है।

चित्र 6. CW १०वाट लीनियर पावर एम्पलीफायर



चित्र 7 (ए). पावर एम्पलीफायर का छोटा सिग्नल प्रदर्शन



चित्र 7 (बी). पावर एम्पलीफायर का आउटपुट

गैटेक और एक निजी भागीदार के साथ 130 W एस–बैंड गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी पावर बार भी सफलतापूर्वक विकसित किया गया है। 1000 पैकेज्ड असतत बिजली उपकरण विकसित किए गए और इलेक्ट्रॉनिक्स और रडार विकास प्रतिष्ठान (एलआरडीई) को वितरित किए गए। जैसा कि चित्र 8 में दिखाया गया है, पैकेज्ड उपकरण 3.1–3.5 गीगाहर्ट्ज के वांछित आवृत्ति बैंड पर सभी विशिष्टताओं को पूरा कर रहे हैं।

चित्र 8. पैकेज्ड १३० वाट GaN HEMT डिवाइस

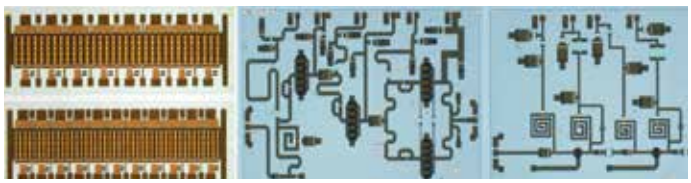
एसएसपीएल ने विकास भागीदारों के साथ मिलकर गैलियम नाइट्राइड–आधारित CW 1 किलोवाट युएचएफ उच्च शक्ति एम्पलीफायर यूनिट को अभिकल्पित और विकसित किया है। इसे एकीकृत परीक्षण परिसर (आईटीआर), बालासोर में टेली–कमांड सिस्टम में सफलतापूर्वक एकीकृत किया गया है जो सभी आवश्यक उपयोगकर्ता विनिर्देशों को पूरा कर रहा है। अभी तक ऐसे ही उपकरण आयात किये जा रहे थे।

गैलियम नाइट्राइड एमएमआईसी पावर एम्पलीफायर, कम शोर एम्पलीफायर, स्विच और टीआर चिप्स

गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी–आधारित सी और एक्स बैंड पावर एम्पलीफायर एमएमआईसी कम शोर एम्पलीफायर और स्विच सर्किट सफलतापूर्वक विकसित (बाहरी पीडीके आधारित) और प्रदर्शित किए गए हैं। 40 वाट पाउट के साथ सी बैंड (5.4–5.9 गीगाहर्ट्ज) और 13 वाट, 20 वाट और 30 वाट पाउट के साथ एक्स बैंड (9–10 गीगाहर्ट्ज) में गैलियम नाइट्राइड एमएमआईसी पावर एम्पलीफायरों को यूएमएस पीडीके का उपयोग करके डिजाइन, निर्मित और चित्रित किया गया है। टीम ने गैलियम नाइट्राइड आधारित 10 वाट C-Ku बैंड और 10 वाट Ku बैंड उच्च शक्ति एम्पलीफायरों, कम शोर एम्पलीफायरों और स्विच एमएमआईसी का प्रदर्शन किया, जो अगली पीढ़ी के इलेक्ट्रॉनिक युद्ध और साधक अनुप्रयोगों के विकास के लिए बड़ी संख्या में आवश्यक हैं। (चित्र 9)

चित्र 9. केयू बैंड स्विच, एलएनए और पावर एम्पलीफायर

रडार अनुप्रयोगों के लिए, पावर एम्पलीफायर, कम शोर वाले एम्पलीफायरों सहित स्वदेशी एस बैंड 130 डब्ल्यू और एक्स बैंड एमएमआईसी को अभिकल्पित किए गए विनिर्देशों को पूरा करते हुए अभिकल्पन, निर्मित और परीक्षण किया गया है। (चित्र 10)



चित्र 10. (ए) १३० वाट पावर बार (बी) पावर एम्पलीफायर (सी) कम शोर वाले एम्पलीफायर

भविष्य के इलेक्ट्रॉनिक युद्ध प्रणालियों और राडार की वर्तमान आवश्यकताओं को देखते हुए, गैलियम नाइट्राइड आरएफ इलेक्ट्रॉनिक्स के लिए पसंदीदा तकनीक बन गया है। इसलिए, व्यावसायिक रूप से व्यवहार्य गैलियम नाइट्राइड सामग्री और एमएमआईसी प्रौद्योगिकी स्थापित करना एक महत्वपूर्ण लक्ष्य है जिसे एसएसपीएल और गैटेक पूरा करने के लिए प्रतिबद्ध हैं। यह रणनीतिक प्रणालियों की भविष्य की सभी आवश्यकताओं को पूरा करने के लिए गैलियम नाइट्राइड प्रौद्योगिकी में आत्मनिर्भरता की दिशा में एसएसपीएल का योगदान है।

आईआरएफपीए

प्रकृति की खोज और मानव जाति की भलाई के लिए प्राकृतिक घटना को नियंत्रित करने और उपयोग करने की क्षमताओं को विकसित करने के लिए मानव क्षमता से परे संवेदना बहुत उपयोगी और आकर्षक रही है। मानव जाति के इतिहास में, इस दिशा में कई प्रयास किए गए और कई अलग–अलग प्रकार के सेंसर विकसित किए गए जो मानव संवेदना में सहायता करते हैं। इन्फ्रारेड सेंसर उनमें से कुछ हैं जो उन तरंग दैर्ध्य बैंड से अधिक तरंग दैर्ध्य को देखने की क्षमता प्रदान करते हैं जिन्हें मनुष्य की जैविक आंखों द्वारा महसूस किया जा सकता है।

इन्फ्रारेड सिस्टम का उपयोग रक्षा, अंतरिक्ष, कानून प्रवर्तन, थर्मोग्राफिक निरीक्षण, खगोलविदों और कई अन्य अनुप्रयोगों में किया जाता है। आईआर इमेजिंग अंधेरे में देखने में सक्षम बनाती है क्योंकि यह दृश्य/वस्तुओं द्वारा उत्सर्जित तापीय ऊर्जा को महसूस करती है। यह निष्क्रिय इमेजिंग को भी सुनिश्चित करता है जो दुश्मन द्वारा पता लगाने से बचने के लिए रक्षा अनुप्रयोगों के लिए बहुत महत्वपूर्ण है। आईआर इमेजिंग की एक अन्य महत्वपूर्ण विशेषता कोहरे, धूल और धुएं में दृश्यता है क्योंकि आईआर विकिरण उनके माध्यम से प्रवेश कर सकता है। इनका उपयोग निगरानी से लेकर उच्च प्रदर्शन लक्ष्य खोज, ट्रैक, अधिग्रहण और मार्गदर्शन जैसे मिशनों में किया जाता है। उच्च प्रदर्शन वाले इन्फ्रारेड सेंसर रात्रि दृष्टि प्रौद्योगिकी के सबसे महत्वपूर्ण तत्व हैं। युद्धक्षेत्र परिदृश्य में उभरते रुझान, खतरे की धारणा, कम तीव्रता वाले संघर्ष/विद्रोह का मुकाबला करने के कारण इन्फ्रारेड फोकल प्लेन एरेज (आईआरएफपीए) के विकास में तेजी से तकनीकी प्रगति हुई है, जिसमें सूक्ष्म आकार के इन्फ्रारेड सेंसर जिसे थर्मल इमेजिंग कैमरे में प्रकाशिकी के फोकल तल पर रखा गया है की 2–डी स्टारिंग सारणी शामिल है। आईआरएफपीए दिन और रात में परिचालन की अनुमति देता है।

दृश्य तापमान में छोटे अंतर को अलग करने के लिए शीत थर्मल इमेजिंग कैमरे सबसे संवेदनशील प्रकार के कैमरे हैं। ये वे हैं जिन्हें युद्ध परिदृश्यों या सैन्य वातावरण के दौरान पसंद किया जाता है। ये वस्तुओं के बीच तापमान के सबसे छोटे अंतर का पता लगा सकते हैं। बढ़ी हुई प्रदर्शन सीमाएं और इन्फ्रारेड निगरानी, नाइट विजन कैमरे, चिकित्सा निदान में थर्मल इमेजिंग आदि के लिए उपयोगकर्ताओं द्वारा वांछित लागत में कमी, इस महत्वपूर्ण क्षेत्र में निरंतर अनुसंधान और विकास के लिए आवश्यक है। इसलिए कम लागत के साथ वांछित प्रदर्शन प्राप्त करने के लिए सामग्री की गुणवत्ता, डिटेक्टर प्रौद्योगिकी और संबंधित इलेक्ट्रॉनिक्स में निरंतर सुधार की आवश्यकता है। गैरशीत आईआरएफपीए उच्च प्रदर्शन वाले शीत आईआरएफपीए की तुलना में कम

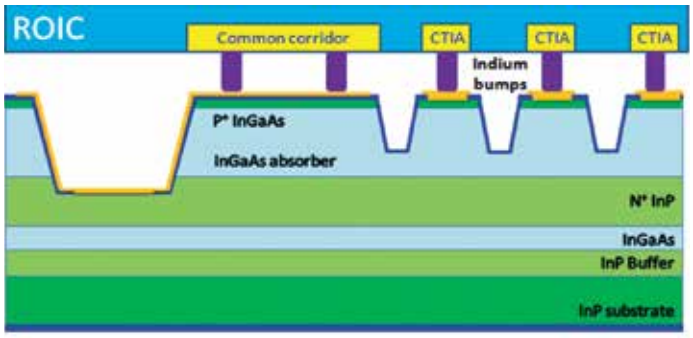
संवेदनशील और धीमे होते हैं। हालाँकि, वे आम तौर पर बहुत कम महंगे होते हैं और शीत आईआरएफपीए की तुलना में उनमें ँच्ए अर्थात आकार, वजन और बिजली की आवश्यकताएं कम होती हैं। इन सेंसरों का निर्माण कम चरणों में अधिक पैदावार के साथ किया जा सकता है। उन्हें कम महंगी वैक्यूम पैकेजिंग की आवश्यकता होती है क्योंकि उन्हें क्रायोकूलर की आवश्यकता नहीं होती है, जो बहुत महंगे उपकरण हैं और शीत आईआरएफपीए की लंबे समय तक विश्वसनीयता को खराब करते हैं। समान परिचालन स्थितियों के तहत उनका सेवा जीवन काफी लंबा होता है। किसी भी खतरे से बचने के लिए सुरक्षा अनुप्रयोगों को अक्सर कैमरों के निरंतर संचालन की आवश्यकता होती है। आईआर इमेजिंग बाजार में शीत और गैरशीत सेंसर सेगमेंट में लगातार बढ़ती मांग देखी जा रही है।

एसएसपीएल पिछले कई वर्षों से शीत और गैरशीत दोनों आईआरएफपीए के विकास पर काम कर रहा है। आईआरएफपीए, प्रयोगशाला का एक प्रमुख क्षेत्र है, जिसमें सामग्री विकास से लेकर अंतिम एकीकृत उपकरण तक अत्याधुनिक प्रौद्योगिकी शामिल है।

एसडब्ल्यूआईआर एफपीए

शॉर्ट वेव इन्फ्रा–रेड (एसडब्ल्यूआईआर), नाममात्र 1–3 μm तरंग दैर्ध्य रेंज, दृश्यमान (VIS, तरंग दैर्ध्य के 0.4–0.8 μm बैंड) और मिड–वेव इंफ्रा–रेड (एमडब्ल्यूआईआर, तरंग दैर्ध्य के 3–5 μm बैंड) के बीच स्थित विद्युत चुम्बकीय स्पेक्ट्रम का क्षेत्र है और इसलिए, दोनों प्रकार के लाभों का आनंद लेता है। एक ओर, तरंग दैर्ध्य एमडब्ल्यूआईआर से कम होने के कारण, यह एमडब्ल्यूआईआर द्वारा प्रदान की गई तुलना में बेहतर रिजॉल्यूशन प्रदान करता है। दूसरी ओर वीआईएस की तुलना में एसडब्ल्यूआईआर की लंबी तरंग दैर्ध्य बेहतर वायुमंडलीय संचरण देती है। एमडब्ल्यूआईआर की तुलना में एसडब्ल्यूआईआर का एक अन्य लाभ उत्सर्जित चित्र के बजाय इमेजिंग के लिए परावर्तित प्रकाश का उपयोग है, जो सक्रिय स्रोत या रात की चमक के साथ बेहतर पहचान क्षमताओं (युद्ध परिदृश्य में मित्र–या–दुश्मन की पहचान) का समर्थन करता है। इसलिए, एसडब्ल्यूआईआर में इमेजिंग उन स्थितियों और अनुप्रयोगों में उपयोगी कंट्रास्ट ला सकती है जहां दृश्यमान या MW/ LW IR थर्मल इमेजिंग कैमरे अप्रभावी हैं। नाइट ग्लो, लेजर रेंज फाइंडर, 3डी इमेजिंग, हाइपर–स्पेक्ट्रल इमेजिंग, वेफर निरीक्षण और विभिन्न अन्य खगोलीय अनुप्रयोगों आदि का उपयोग करके रात्रि दृष्टि सहित विभिन्न रक्षा और नागरिक अनुप्रयोगों के लिए इन डिटेक्टरों की भारी आवश्यकता है। एसडब्ल्यूआईआर इमेजिंग के लिए उपयुक्त विभिन्न संभावित सामग्री प्रणालियों में से, 920 एनएम से 1700 एनएम तक तरंग दैर्ध्य के लिए उच्च क्वांटम दक्षता के साथ कमरे के तापमान पर काम करने के लिए InGaAs फोटोडायोड की क्षमता (जिसे 500 एनएम से 2800 एनएम तरंग दैर्ध्य के बैंड तक भी बढ़ाया जा सकता है) इसे एसडब्ल्यूआईआर इमेजिंग अनुप्रयोगों के लिए पसंद की एक इष्टतम सामग्री बनाता है।

प्रकाशिकी के फोकल तल पर रखे गए दो आयामी छवि सेंसर सरणी को फोकल प्लेन एरे (एफपीए) कहा जाता है। ये एफपीए आमतौर पर दो चिप्स को हाइब्रिड करके बनाए जाते हैं, एक में वांछित प्रारूप की डिटेक्टर सरणी होती है और दूसरे में डिटेक्टर सरणी के सभी व्यक्तिगत डिटेक्टर तत्वों से पता लगाए गए सिग्नल एकत्र करने के लिए सिग्नल प्रोसेसिंग सर्किटरी होती है। दो चिप्स, यानी डिटेक्टर ऐरे चिप और रीडआउट चिप को फ्लिप चिप प्रक्रिया का उपयोग करके इंडियम बम्प्स का उपयोग करके एक साथ जोड़ा जाता है। एसडब्ल्यूआईआर डिटेक्टरों के लिए, प्दळं। उपयुक्त सामग्री है, जबकि सिलिकॉन उच्च प्रदर्शन मिश्रित सिग्नल वीएलएसआई सर्किट को साकार करने के लिए उपयुक्त एकमात्र सामग्री है। इसलिए, जैसा कि चित्र 11 में दिखाया गया है, एसडब्ल्यूआईआर एफपीए को साकार करने के लिए प्दळं। फोटो–डिटेक्टर सरणी को सिलिकॉन रीडआउट इंटीग्रेटेड सर्किट (आरओआईसी) के साथ एकीकृत किया गया है।



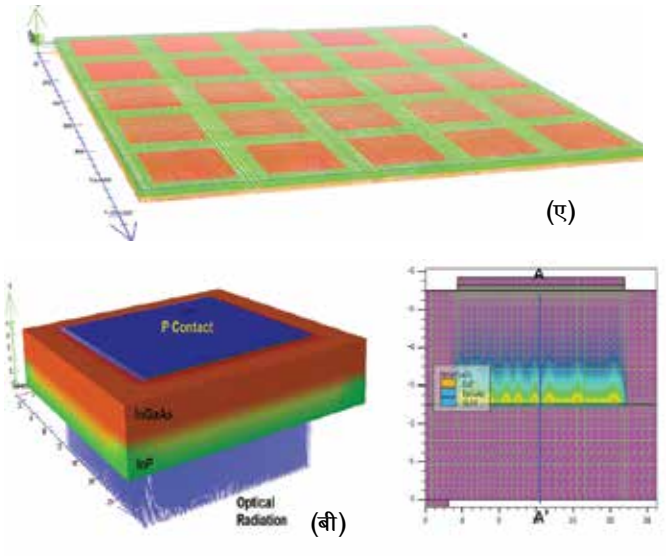
चित्र 11. InGaAs-आधारित SWIR FPA का योजनाबद्ध क्रॉस-सेक्शन

एसएसपीएल ने हाल ही में InGaAs/InP की पिन डिटेक्टर सरणी बनाने के लिए सेमीकंडक्टर प्रक्रिया प्रौद्योगिकी का उपयोग करके एसडब्ल्यूआईआर एफपीए बनाने की तकनीक विकसित की है और एसडब्ल्यूआईआर इमेजिंग क्षमता का प्रदर्शन किया है। इसमें मेसा नक्काशी, निष्क्रियता, संपर्क धातुकरण, इंडियम बम्प्स का उपयोग करके आरओआईसी चिप के साथ डिटेक्टर सरणी की फ्लिप चिप बॉन्डिंग, बैक साइड सब्सट्रेट पॉलिशिंग, हर्मेटिकली सीलबंद उच्च तापमान सह–फायर्ड सिरेमिक (एचटीसीसी) पैकेज और थर्मोइलेक्ट्रिक कूलर (टीईसी) के पश्चात शून्य बायस ऑपरेशन के लिए

न्यूनतम डार्क करंट और अधिकतम फोटो–प्रतिक्रिया के लिए घर में तैयार की गई पूरी प्रक्रिया डिजाइन के साथ–साथ मेसा संरचित डिटेक्टर सरणी के लिए एक विस्तृत डिजाइन का विकास शामिल है। प्रभावी दोहराव, विश्वसनीयता और उपज में सुधार के लिए प्रत्येक इकाई प्रक्रिया अनुकूलन के अधीन है।

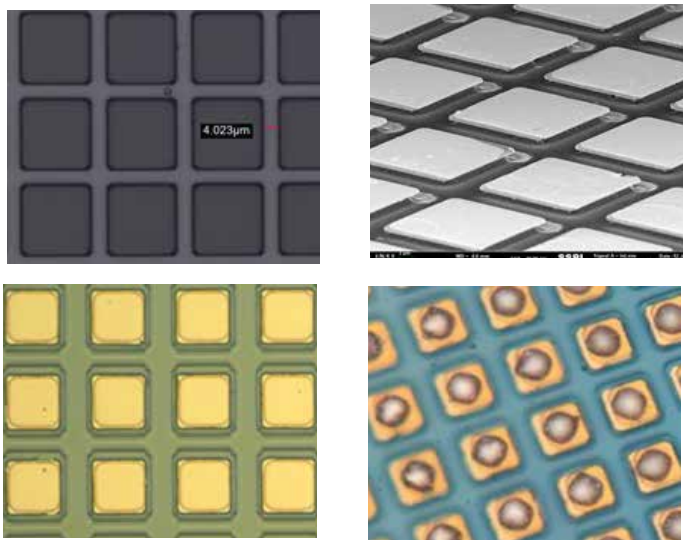
डिटेक्टर ऐरे को उद्योग मानक एटलस डिवाइस सिम्युलेटर में 2डी और 3डी संख्यात्मक सिमुलेशन का उपयोग करके डिजाइन किया गया था जैसा कि चित्र 12 में दिखाया गया है। चित्र 12 (ए) 5×5 मिनी डिटेक्टर ऐरे का 3डी मॉडल दिखाता है। केंद्रीय पिक्सेल को घटना एसडब्ल्यूआईआर फ्लक्स के साथ सिम्युलेटेड किया गया था और फोटो उत्पन्न वाहकों की जांच 2डी कट–प्लेन में की गई थी जैसा कि चित्र 12 (बी) में दिखाया गया है।

विकसित प्रक्रिया में, पी–आई–एन फोटोडायोड को डिटेक्टर पिक्सल के बीच इलेक्ट्रिकल और ऑप्टिकल पृथक्करण के लिए मेसा बनाकर In0.53Ga0.47As एपि–लेयर



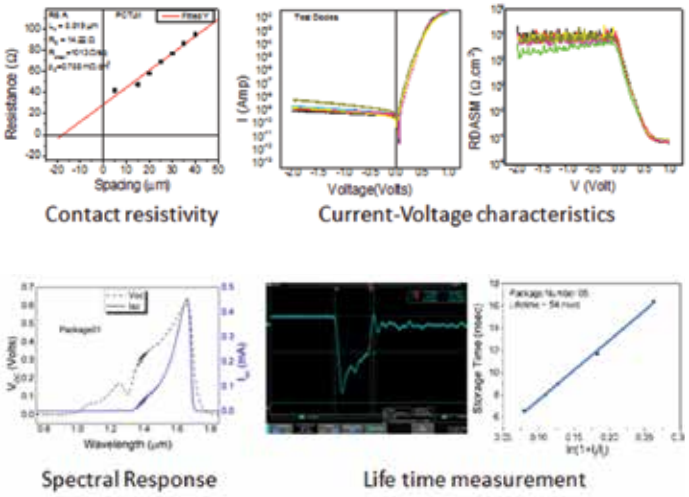
चित्र 12. 5×5 मिनी डिटेक्टर ऐरे का 3डी मॉडल

से मेल खाने वाली जाली पर निर्मित किया गया था, जिसे Si_3N_4 पैसिवेशन लेयर का उपयोग करके निष्क्रिय किया गया था। संपर्क पैड निष्क्रियता परत में खोले गए थे और फोटोडायोड से पी संपर्क मेसा पर पी InGaAs से लिए गए हैं। n+ सामान्य संपर्क एक गहरी खाई का उपयोग करके लिया गया था जो n+ InP परत तक पहुंचती है। आम संपर्क, वास्तव में खाई के नीचे से लिया गया, फ्लिप–चिप संकरण प्रक्रिया को सूट करने के लिए सरणी डायोड संपर्कों के स्तर तक बढ़ाया जाता है। प्रत्येक व्यक्तिगत फोटोडायोड का पी पक्ष आरओआईसी यूनिट कोशिकाओं से जुड़ा होता है, जो अधिकतर कैपेसिटिव ट्रांस–इम्पेडेंस एम्पलीफायर (सीटीआईए) होता है। n+ सामान्य संपर्क इंडियम बम्प का उपयोग करके आरओआईसी के सामान्य कनेक्शन रिंग से जुड़ा है। डिटेक्टर सरणी के कुछ अनुभागों की तस्वीरें व्यक्तिगत प्रक्रिया चरणों के बाद चित्र 13 में दिखाई गई हैं।



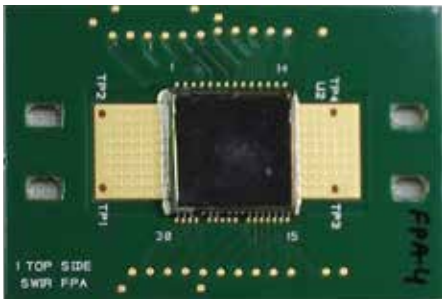
चित्र 13 (ए) मेसा इचिंग के बाद डिटेक्टर ऐरे के अनुभागों की तस्वीरें, (बी) मेसा इचिंग के बाद एसईएम चित्र, (सी) धात्वीकरण के बाद फोटोग्राफ, (डी) इंडियम बम्प ग्रोथ के बाद फोटोग्राफ

डिटेक्टर तत्वों और परीक्षण संरचनाओं के प्रदर्शन का मूल्यांकन टर्मिनल विद्युत विशेषताओं को मापने और विशेषता प्रदर्शन मापदंडों को निकालकर किया गया है। (चित्र 14)

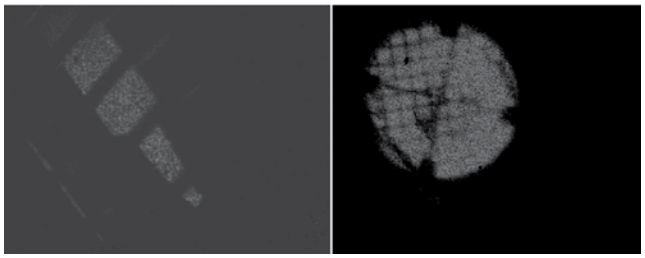


चित्र 14. डिटेक्टर तत्वों और परीक्षण संरचनाओं पर विभिन्न मापों के परिणाम

एसडब्ल्यूआईआर एफपीए को उनके रेडियोमेट्रिक प्रतिक्रिया के लिए अंतरिक्ष अनुप्रयोग केंद्र (एसएसी), इसरो, अहमदाबाद में चिप–ऑन–बोर्ड (सीओबी) पीसीबी में जोड़कर परीक्षण किया गया जैसा कि चित्र 15 (ए) में दिखाया गया है। एसडब्ल्यूआईआर फ्लक्स पर अच्छी प्रतिक्रिया दिखाने के बाद, इन एफपीए ने एसडब्ल्यूआईआर ऑप्टिक्स का उपयोग करके वस्तुओं पर ध्यान केंद्रित करने पर उनकी अच्छी एसडब्ल्यूआईआर छवि भी दिखाई। गर्म वस्तु की छवियां, जैसे सोल्डरिंग आयरन और गर्म हवा उड़ाने वाला यंत्र चित्र 15 (बी) में दिखाए गए हैं।



(ए)



(बी)

चित्र 15. (ए) सीओबी पीसीबी पर स्थापित SWIR FPA, (बी) SWIR FPA के साथ प्राप्त सोल्डरिंग आयरन और हॉट एयर ब्लोअर की छवियां

एमडब्ल्यूआईआर/एलडब्ल्यूआईआर एफपीए

शीत कैमरे आमतौर पर लॉन्ग–वेव इन्फ्रारेड (एलडब्ल्यूआईआर) या मिड–वेव इन्फ्रारेड (एमडब्ल्यूआईआर) बैंड में काम करने के लिए अभिकल्पित किए जाते हैं। आधुनिक शीत थर्मल इमेजिंग कैमरे में उपयोग किए जाने वाले आईआरएफपीए को 'देवर' नामक एक उच्च तकनीक पैकेज में रखा जाता है और एक क्रायोकूलर के साथ एकीकृत किया जाता है जो सेंसर तापमान को क्रायोजेनिक तापमान तक कम कर देता है। सेंसर तापमान में यह कमी थर्मल–प्रेरित शोर को चित्रित किए जा रहे दृश्य से सिग्नल के नीचे के स्तर तक कम करने के लिए आवश्यक है। उच्च प्रदर्शन करने वाले आईआरएफपीए के लिए एक जटिल तकनीक की आवश्यकता होती है जिसमें कई उप–प्रौद्योगिकियां और प्रक्रिया एकीकरण शामिल होते हैं और इसे संयुक्त राज्य अमेरिका, फ्रांस, इजराइल और यूके जैसे बहुत ही उन्नत देशों द्वारा विकसित किया गया है। इनमें से अधिकांश प्रौद्योगिकियाँ रणनीतिक प्रकृति की हैं। एसएसपीएल HgCdTe–आधारित शीत आईआरएफपीए पर काम कर रहा है। आईआरएफपीए में दो आयामी फोटोवोल्टिक (पीवी) इन्फ्रारेड डिटेक्टर ऐरे शामिल है जो एक पतली (~ 10μm) HgCdTe परत पर निर्मित होती है जो एक जाली से मेल खाने वाले CdZnTe (सीजेडटी) सब्सट्रेट पर विकसित होती है, जिसे रीड–आउट इंटीग्रेटेड सर्किट (आरओआईसी) में हाइब्रिड किया जाता है और क्रायो–कूलर में एकीकृत एक उपयुक्त देवर असेंबली में पैक किया जाता है। आईआरएफपीए तकनीक में कई उप–प्रौद्योगिकियां शामिल हैं, जैसे CdZnTe सब्सट्रेट्स की वृद्धि, इन सब्सट्रेट्स पर HgCdTe एपिलेयर की वृद्धि, फोटोडायोड सरणी का निर्माण, संगत सीएमओएस आरओआईसी का डिजाइन और विकास, डिटेक्टर सरणी का फ्लिप चिप संकरण और आरओआईसी जिसके परिणामस्वरूप सेंसर चिप असेंबली (एससीए), सामरिक देवर और जेटी (जूल–थॉमसन) कूलर का विकास और एससीए, देवर और कूलर का अंतिम एकीकरण जिसे डिटेक्टर–देवर कूलर असेंबली (डीडीसीए) कहा जाता है। एसएसपीएल ने एमडब्ल्यु आईआरएफपीए प्रारूप 320X256/30 μm के साथ–साथ 384X288/15 μm, 640X512/15 μm के लिए प्रयोगशाला स्तर पर इन सभी उप–प्रौद्योगिकियों को विकसित किया है और मानव लक्ष्य की थर्मल छवियों का प्रदर्शन किया है।

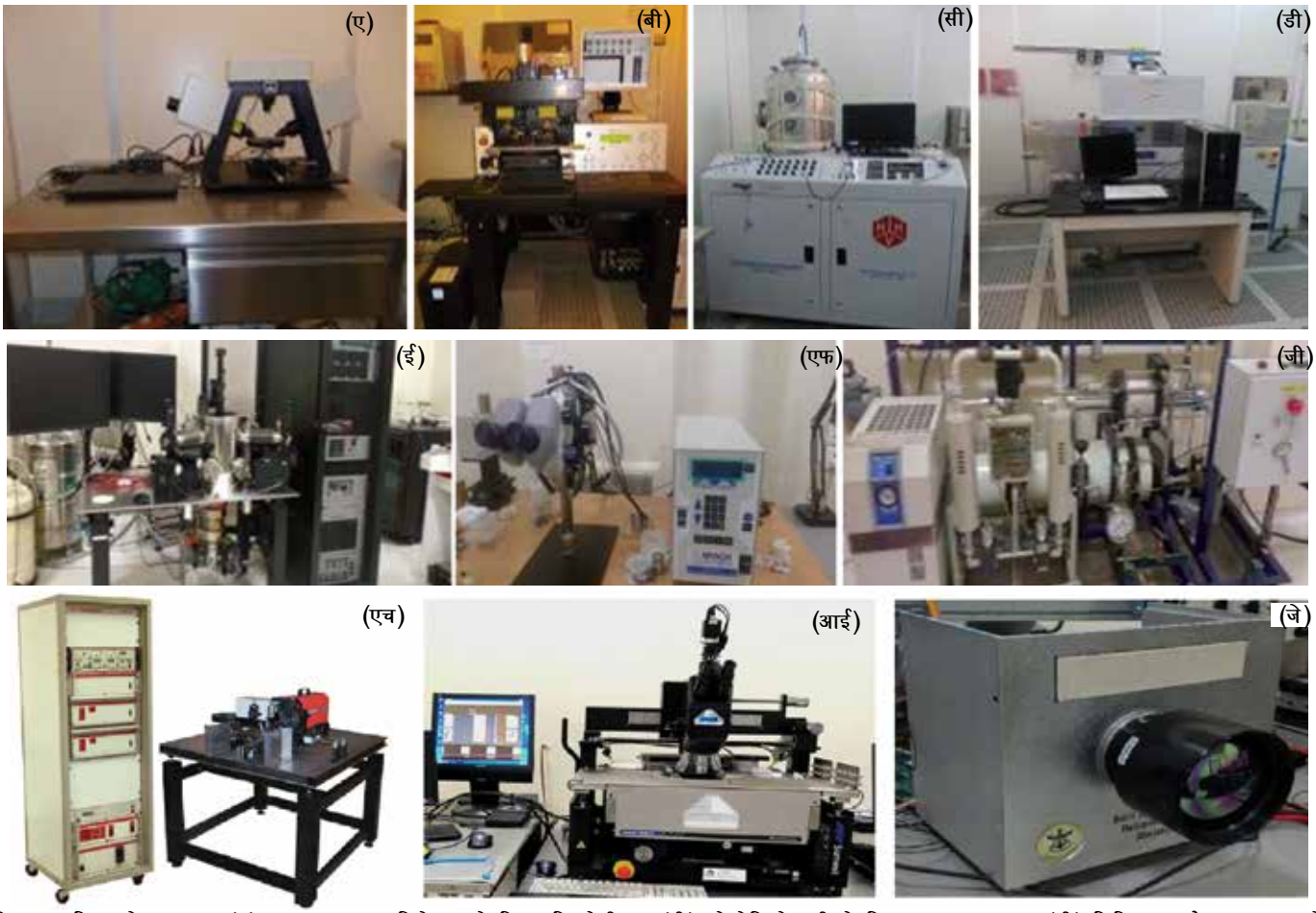
आईआरएफपीए प्रौद्योगिकियों के लिए रणनीतिक सामग्री विकास कार्यक्रम के तहत, अर्धचालक सामग्रियों के थोक क्रिस्टल, जैसे सीजेडटी (कैडमियम जिंकटेल्यूराइड, Zn= ~ 4%), Ge (Sb डोप्ड जर्मेनियम) और एपिटैक्सियल परत एमसीटी (मर्करी कैडमियम टेल्यूराइड) को अपेक्षित आकार और गुणवत्ता में उगाया और तैयार किया जाता है। पिछले कुछ वर्षों में, इन विशिष्ट क्षेत्रों में कई तकनीकी उपलब्धियाँ, सफलताएँ और उत्पाद विकास हुए हैं। इनका विवरण पहले ही 'उन्नत सामग्री' (खंड 31 अंक 2, अप्रैल 2023) के अंतर्गत कवर किया जा चुका है।

द्वि–आयामी डिटेक्टर ऐरे के निर्माण में कई प्रक्रिया चरण शामिल होते हैं, जैसे सतह की तैयारी, सतह निष्क्रियता, फोटोलिथोग्राफी, आयन आरोपण, गीली नकक्काशी, सूखी नकक्काशी, और HgCdTe एपिलेयर्स पर किया जाने वाला धातुकरण। इनमें से प्रत्येक चरण आईआरएफपीए की वांछित संवेदनशीलता प्राप्त करने के लिए महत्वपूर्ण है। इन प्रक्रिया चरणों को HgCdTe की क्षति प्रवण प्रकृति के साथ–साथ थर्मल बाधा और एसएसपीएल में प्रक्रिया नियंत्रण मॉनिटर का उपयोग करके योग्य के तहत विकसित किया गया है। डिटेक्टर सरणी परीक्षण एक क्रायो–प्रोबर में किया जाता है जो परीक्षण के दौरान डिटेक्टर तापमान को 80K तक लाता है। एसएसपीएल का विकसित स्वदेशी आरओआईसी 'एन ऑन पी' प्रकार एचजीसीडीटीई फोटोडायोड के लिए 320X256

ऐरे है, अर्थात, इसे इलेक्ट्रॉनों को एकीकृत करने के लिए डिजाइन किया गया है। एससीएल, चंडीगढ़ के सहयोग से 384X288 आरओआईसी के विकास के साथ–साथ 640X512 सरणी के लिए एक ऑफ–द–शेल्फ आरओआईसी भी खरीदा गया है। एसएसपीएल में आरओआईसी के परीक्षण के लिए परीक्षण सेटअप स्थापित किए गए हैं। एक हाइब्रिड फोकल प्लेन ऐरे को साकार करने के लिए आरओआईसी और डिटेक्टर ऐरे को इंडियम बम्प्स के माध्यम से फ्लिप चिप से जोड़ा जाता है जो डिटेक्टर ऐरे और आरओआईसी चिप दोनों पर उगाए जाते हैं। चूंकि दो अलग–अलग सामग्रियों को जोड़ा जा रहा है, कमरे के तापमान से डिटेक्टर ऑपरेटिंग तापमान तक तापमान चक्र, यानी, 80K, के परिणामस्वरूप संरेखण में बदलाव आएगा।

सामान्य तौर पर, डिटेक्टर ऐरे सिलिकॉन आरओआईसी से अधिक मात्रा में अनुबंधित होगी जिसकी गणना ज्ञात थर्मल विस्तार गुणांक से की जा सकती है। इंडियम बम्प्स और फ्लिप चिप बॉन्डिंग प्रक्रिया को विकसित करने की तकनीक इस तरह विकसित की गई है कि ये हाइब्रिड ऐरे बड़ी संख्या में तापमान चक्रों का सामना कर सकते हैं। आईआरएफपीए की पैकेजिंग के लिए उपयुक्त एक संपूर्ण धातु दीवार विकसित की गई है जिसमें एचटीसीसी फीड–थ्रु, डिटेक्टर कैरियर/हेडर, शीत शील्ड, आंतरिक दीवार ट्यूब, निकासी ट्यूब इत्यादि जैसे विभिन्न घटकों की डिजाइन और असेंबली शामिल है, इसके बाद एकीकरण, डीगैसिंग और देवारों की वैक्यूम सीलिंग शामिल है। एसएसपीएल देवर घटकों को डिजाइन करने और इसे रिसाव दर $<10^{-12}$ मानक सीसी/सेकेंड के साथ सील करने में सक्षम है। चूंकि उच्च प्रदर्शन वाले एमडब्ल्यूआईआर डिटेक्टर क्रायोजेनिक तापमान पर काम करते हैं, एसएसपीएल ने आईआरएफपीए के लिए क्रायोजेनिक कूलर भी विकसित किए हैं।

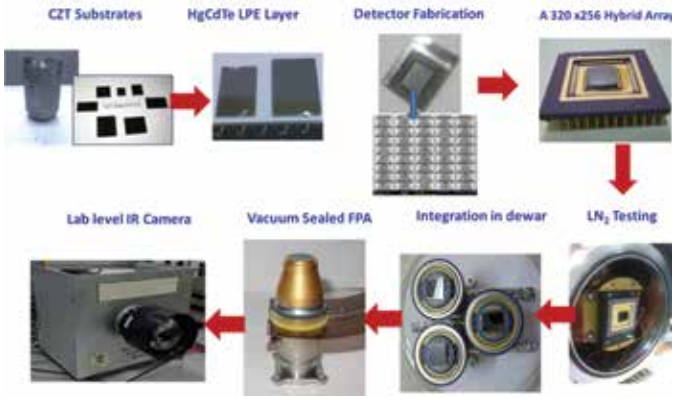
प्रयोगशाला स्तर पर 320X256/30μm, 640X512/15μm, और 384X288/15μm एमडब्ल्यूआईआर एफपीए एफपीए के लिए इन प्रौद्योगिकियों को स्थापित करने के लिए विभिन्न उपकरण स्थापित किए गए हैं। एसएसपीएल में स्थापित इनमें से कुछ उपकरणों की छवियां चित्र 16 में दिखाई गई हैं।



चित्र 16. दिख रहे उपकरण (ए) HgCdTe सतह विशेषता के लिए एलिप्सोमीटर, (बी) फोटोलिथोग्राफी के लिए मास्क एलाइनर, (सी) निष्क्रियता और धातुकरण के लिए वैक्यूम कोटिंग यूनिट, (डी) सूखी इचिंग के लिए आईसीपी आरआईई, (ई) 80 K पर डिटेक्टर ऐरे परीक्षण के लिए क्रायोप्रोबर, (एफ) फीडथ्रु के साथ विद्युत कनेक्शन के लिए समानांतर गैप वेल्डिंग, (जी) देवर की अल्ट्रा हाई वैक्यूम सीलिंग के लिए यूएचवी, (एच) एफपीए टेस्टर, (आई) वेफर प्रोबर, (जे) स्वदेशी रूप से विकसित लैब लेवल आईआर कैमरा

इन डिटेक्टरों के लिए योग्यता का चित्र शोर समतुल्य तापमान अंतर (एनईटीडी) है जो न्यूनतम तापमान अंतर का प्रतिनिधित्व करता है जो डिटेक्टर में उसके अस्थायी शोर के बराबर सिग्नल उत्पन्न करता है। यह मूल रूप से आईआर इमेजर की संवेदनशीलता है; एनईटीडी जितना कम होगा, डिटेक्टर उतना अच्छा होगा।

नीचे दिए गए चित्र 17 (ए) और (बी) में शीत आईआरएफपीए के साथ–साथ निर्मित डीडीसीए के निर्माण में शामिल विभिन्न उप–प्रौद्योगिकियों और प्रक्रियाओं को दर्शाया गया है।

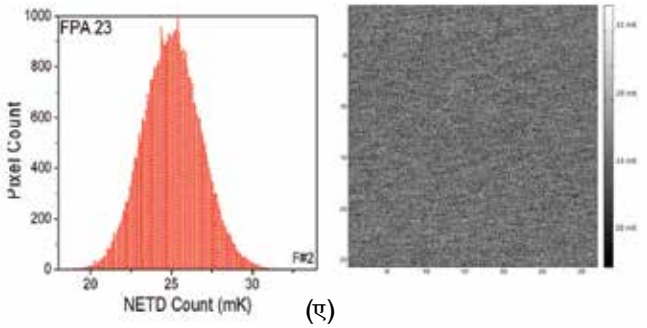


(ए)

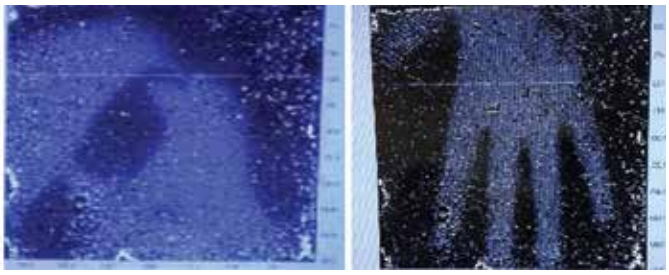
(बी)

चित्र 17 (ए). शीत आईआरएफपीए प्रौद्योगिकी के लिए स्वदेशी रूप से विकसित उप-प्रौद्योगिकियां (बी) डीडीसीए में 640x512/384x288 एफपीए

कम एनईटीडी प्राप्त करने के लिए, डिटेक्टर, आरओआईसी, परिधीय इलेक्ट्रॉनिक्स, यानी, आईआर इमेजर के प्रत्येक व्यक्तिगत घटक को प्रदर्शन करने की आवश्यकता होती है। यह कई अन्य मापदंडों पर भी निर्भर करता है, जैसे प्रकाशिकी का एफ–नंबर, एकीकरण समय और दृश्य कंट्रास्ट जो फिर से दृश्य के तापमान पर निर्भर करता है। एसएसपीएल में निर्मित सर्वोत्तम एफपीए का अनुमानित एनईटीडी नीचे चित्र 18 (ए) में 2डी तीव्रता मानचित्र के साथ–साथ हिस्टोग्राम रूप में दिखाया गया है। आईआर छवियां जेटी कूलर से ठंडा किए गए पूर्ण डीडीसीए से ली गई थीं। इस डीडीसीए के साथ, मानव लक्ष्य की आईआर छवियां और वीडियो देखे गए हैं जैसा कि चित्र 18 (बी) में दिखाया गया है।



(ए)



(बी)

चित्र 18 (ए) एसएसपीएल में निर्मित सर्वश्रेष्ठ एफपीए का मापा गया एनईटीडी (हिस्टोग्राम रूप के साथ-साथ 2डी तीव्रता मानचित्र) (बी) मानव लक्ष्य की MWIR छवियां

शीत आईआरएफपीए प्रौद्योगिकी का तीव्र गति से विस्तार जारी है और निकट भविष्य में सैन्य अनुप्रयोगों के लिए और विकास देखा जाएगा। दुनिया भर में वर्तमान अनुसंधान एवं विकास प्रयास मुख्य रूप से लागत कम करने या रिजॉल्यूशन में सुधार करने के लिए एसडब्ल्यूएपी और निचली पिच ऐरे को कम करने के लिए उच्च ऑपरेटिंग तापमान (एचओटी) फोटो–डिटेक्टर विकसित करने पर केंद्रित हैं। एसएसपीएल एचओटी डिटेक्टरों और बड़े प्रारूप, छोटे पिच एमडब्ल्यूआईआर ऐरे (1K×1K/10μm) के विकास पर भी काम कर रहा है।

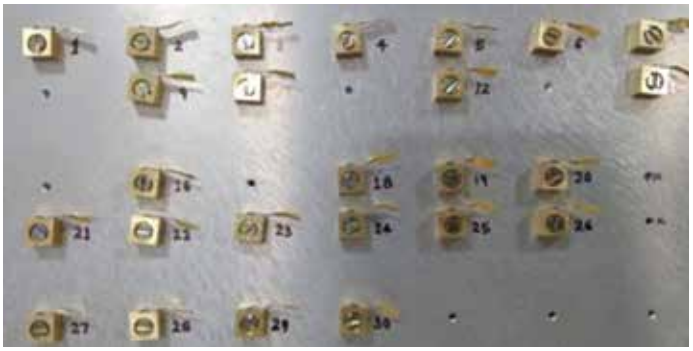
उच्च शक्ति लेजर डायोड

उच्च शक्ति वाले लेजर डायोड में रेंज फाइंडर, डैजलर, प्रॉक्सिमिटी फ्यूज, बाड़ लगाना, विस्फोटक आरंभ इत्यादि जैसे कई अनुप्रयोग होते हैं। एसएसपीएल ने उपरोक्त अनुप्रयोगों के लिए संचालन और आउटपुट पावर के विभिन्न मोड में एकल उत्सर्जक लेजर डायोड, ऐरे, स्टैक और फाइबर युग्मित लेजर डायोड (एफसीएलडी) को शामिल करते हुए उच्च शक्ति वाले लेजर डायोड के लिए विभिन्न प्रौद्योगिकियां विकसित की हैं। वर्तमान में, एसएसपीएल वर्तमान स्वदेशी लेजर डायोड प्रौद्योगिकियों के लिए देश में विनिर्माण आधार स्थापित करने की दिशा में काम कर रहा है। गतिविधि के दायरे में लेजर डायोड प्रौद्योगिकी की स्थापना और प्रोटोटाइप विकास शामिल है। डिलिवरेबल्स एकल उत्सर्जक लेजर डायोड और एफसीएलडी के प्रोटोटाइप हैं।

लेजर डायोड मॉड्यूल और सी/एफ-माउंटेड लेजर डायोड का विकास

लेजर फेंसिंग वांछित क्षेत्र में संदिग्ध घुसपैठ की निगरानी और पता लगाने की एक तकनीक है। एसएसपीएल ने लेजर फेंसिंग सिस्टम के लिए मॉड्यूल विकसित किया है। लेजर डायोड मॉड्यूल फेंसिंग प्रणाली का हृदय है। इसमें सी–माउंट पैकेज पर 1–2 डब्ल्यू सीडब्ल्यू इंफ्रारेड वेवलेंथ लेजर डायोड, लेजर कोलिमेशन लेंस, एक हीट सिंक और मॉड्यूल के एयर कूलिंग के लिए एक पंखा शामिल है। 100 मीटर बाड़ लगाने की सीमा के लिए लेजर बाड़ लगाने वाले मॉड्यूल का सफलतापूर्वक परीक्षण किया गया है और लेस्टेक को वितरित किया गया है (चित्र 19)। सी–माउंटेड लेजर डायोड इकाइयां (चित्र 20) तालिका 2 में सूचीबद्ध विशिष्टताओं के अनुसार उनकी आगामी आवश्यकताओं के लिए सीईएल, साहिबाबाद को वितरित की गईं।

चित्र 19. लेजर डायोड मॉड्यूल



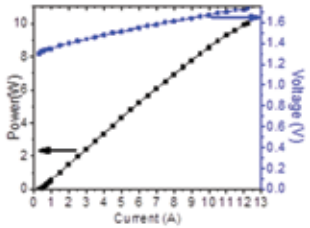
चित्र 20. सी-माउंटेड लेजर डायोड

तालिका 2. लेजर डायोड की विशिष्ट विशिष्टता

पावर आउटपुट	1-2 watt
तरंगदैर्ध्य	976 nm
ढलान दक्षता	~ 830 mW/A
थ्रेसहोल्ड करंट	~0.3Amp
पैकेट	C-mount

एसएसपीएल CW मोड में 10 वाट तक उत्सर्जन करने वाले सिंगल स्ट्राइप पैकेज्ड लेजर डायोड विकसित कर रहा है। चिप्स को गैटेक और एसएसपीएल में एसएसपीएल की तकनीक का उपयोग करके संयुक्त रूप से निर्मित किया गया है और उपयोगकर्ता की आवश्यकताओं के अनुसार F–माउंट (10 वाट, CW) पैकेज पर लगाया गया है (चित्र 21)। 10 वाट सिंगल स्ट्राइप लेजर डायोड की प्रकाश–वर्तमान विशेषता चित्र 22 में दिखाई गई है। 10 वाट सीडब्ल्यू सिंगल एमिटर फाइबर युग्मित लेजर डायोड विस्फोट के लिए विस्फोटकों की शुरुआत में सीधे आवेदन पाते हैं। सी–माउंट लेजर डायोड का उपयोग लेजर फेंसिंग एप्लिकेशन में किया जाता है।

चित्र 21. एफ-माउंट लेजर डायोड



चित्र 22. 10 वाट लेजर डायोड की प्रकाश धारा विशेषताएँ

एफसीएलडी मॉड्यूल का विकास

10 वाट सीडब्ल्यू एकल उत्सर्जक लेजर डायोड उच्च शक्ति एफसीएलडी मॉड्यूल के विकास के लिए बुनियादी बिल्डिंग ब्लॉक के रूप में कार्य करता है। इन मॉड्यूल में कई एकल उत्सर्जक शामिल होते हैं और इन एकल उत्सर्जक के बीम संयोजन के बाद आउटपुट को मल्टीमोड फाइबर से जोड़ा जाता है। एसएसपीएल औद्योगिक भागीदार के साथ संयुक्त रूप से 976nm उत्सर्जित करने वाले 10 वाट, 30 वाट, 35 वाट (चित्र 23) और 70 वाट CW एफसीएलडी मॉड्यूल विकसित कर रहा है।

विस्फोट के लिए विस्फोटकों की शुरूआत में एफसीएलडी मॉड्यूल का टीबीआरएल में परीक्षण किया गया। एफसीएलडी का उपयोग पावर लेवल को बढ़ाने के लिए फाइबर लेजर को पंप करने के लिए भी किया जाता है। 250 वाट और उससे अधिक तक की उच्च शक्ति के एफसीएलडी मॉड्यूल विकसित करने के लिए काम प्रगति पर है।

चित्र 23. फाइबर युग्मित लेजर डायोड एफसीएलडी-35

नीला/हरा लेजर डायोड

रक्षा अनुप्रयोगों के लिए अंतर्जलीय संचार एक प्रमुख क्षेत्र है। परंपरागत रूप से अधिकांश अंतर्जलीय संचार प्रणालियाँ ध्वनिक होती हैं और उनमें अपेक्षाकृत कम बैंडविड्थ होती है। सोनार संचार का उपयोग अधिक बार किया जाता है, लेकिन उपलब्ध मॉडेम और ट्रांसड्यूसर बहुत बड़े और बहुत महंगे हैं।

उच्च बैंडविड्थ, कम दूरी के अंतर्जलीय ऑप्टिकल संचार में ध्वनिक तरीकों को बढ़ाने की उच्च क्षमता है। ऑप्टिकल स्पेक्ट्रम के नीले–हरे क्षेत्र में समुद्री जल में न्यूनतम क्षीणन होता है। नीले–हरे क्षेत्र में निकलने वाले लेजर स्रोतों का उपयोग करके पनडुब्बी से लेकर मानव रहित अंतर्जलीय वाहन (यूयूवी) के साथ–साथ अंतर्जलीय ऑप्टिकल सेंसर जैसी विभिन्न अंतर्जलीय संस्थाओं के बीच संचार को महसूस किया जा सकता है। स्पेक्ट्रम के नीले–हरे हिस्से में संचालित एक मुक्त अंतरिक्ष लेजर संचार प्रणाली में समुद्र के अन्दर बहुत उच्च डेटा दरों पर संचारित करने की क्षमता है।

नीले/हरे लेजर डायोड को विकसित करने का सबसे आशाजनक और व्यवहार्य मार्ग गैलियम नाइट्राइड गैलियम नाइट्राइड–आधारित सामग्री प्रणालियों को नियोजित करना है। ऐसे लेजर डायोड विकसित करने के लिए InGaN/AlGaN/GaN आधारित मल्टीपल क्वांटम वेल लेजर संरचनाओं का उपयोग किया जा रहा है। सक्रिय क्षेत्र में $In_xGa_{1-x}N$ क्वांटम कुओं में इंडियम सामग्री का चयन करके, 400nm से 550nm तरंग दैर्ध्य रेंज में उत्सर्जित लेजर डायोड का एहसास करना संभव है।

प्रमुख चुनौतियां

गैलियम नाइट्राइड आधारित लेजर संरचनाएं आमतौर पर सी–प्लेन पर बनाई जाती हैं। सहज और पीजोइलेक्ट्रिक ध्रुवीकरण के मुद्दों के अलावा, विभिन्न विकास और निर्माण चुनौतियां भी हैं। हरे लेजर डायोड के विकास के लिए InGaN मल्टी क्वांटम वेल (MQW) परतों में इंडियम (In) सामग्री में वृद्धि की आवश्यकता होती है। उच्च गुणवत्ता वाले इंडियम समृद्ध InGaN/GaN Qws का विकास अभी भी सामग्री से संबंधित कई मुद्दों के कारण प्रमुख तकनीकी चुनौती है, जैसे कि InGaN और गैलियम नाइट्राइड के बीच उच्च लेटेस बेमेल, कम विकास तापमान की आवश्यकता के कारण सामग्री की गिरावट, इन–सेग्रीगेशन और चरण पृथक्करण और पी टाइप डोपिंग। इसके अलावा, उच्च कार्य फंक्शन धातु की आवश्यकता के कारण पी–ओमिक संपर्क निर्माण एक बड़ी चुनौती है। विभिन्न धातु योजनाएं, जैसे Ni-Au, Pd/Au आदि लागू की गई हैं और कम प्रतिरोधक पी–संपर्क प्राप्त करने के लिए आगे काम जारी है।

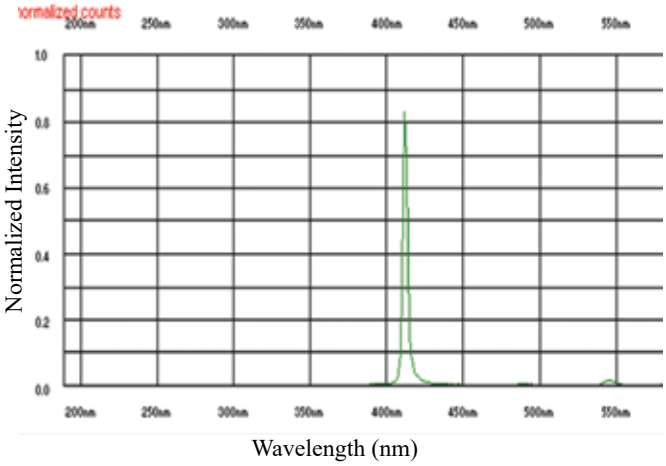
एसएसपीएल ने हाल ही में InGaN/GaN आधारित अर्द्धचालक लेजर के निर्माण के लिए एक शोध गतिविधि शुरू की है। निर्माण प्रक्रिया में रिएक्टिव आयन एचिंग (आरआईई) प्रक्रिया का उपयोग करके मेसा एचिंग द्वारा पट्टी निर्माण, पी और एन की तरफ कम प्रतिरोध ओमिक संपर्क गठन, पीसने, लैपिंग और पॉलिशिंग, विवर गठन, पार्श्व कोटिंग और पैकेजिंग द्वारा एपिटैक्सियल संरचना को पतला करना शामिल है।

गैलियम नाइट्राइड–आधारित लेजर डायोड के प्रसंस्करण में प्रमुख चुनौतियों में से एक लेजर विवर पार्श्व का निर्माण है। आमतौर पर, लेजर कैविटी विवर अर्द्धचालक सामग्री को साफ करके बनाए जाते हैं। सी–लेन ग्रीन लेजर के लिए, एम–प्लेन क्लीव्ड–फेसेट्स को क्लीविंग द्वारा बनाया जा सकता है, क्योंकि एम–प्लेन क्लीवेज प्रसार के लिए अनुकूल है। हालाँकि, अर्द्ध–ध्रुवीय अभिविन्यासों के लिए धारी दिशा का विकल्प सीमित है और क्लीविंग द्वारा पार्श्व का निर्माण बहुत कठिन है।

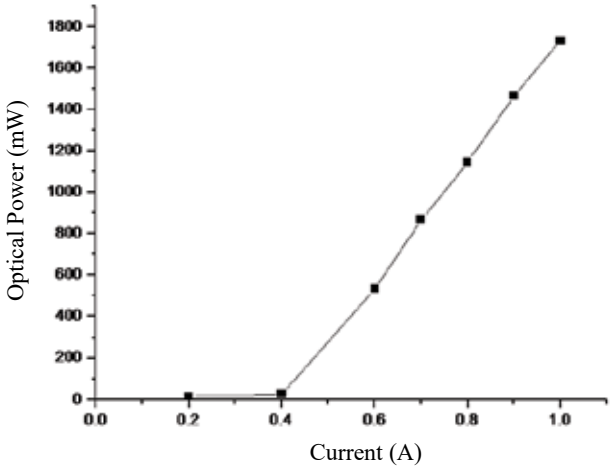
InGaN Qws में ऑप्टिकल लाभ अपेक्षाकृत कम है। मध्यम वर्तमान घनत्व पर लेजिंग स्थितियों तक पहुंचने के लिए कुल ऑप्टिकल नुकसान को कम करना होगा। ऑप्टिकल नुकसान और थ्रेसहोल्ड करंट को कम करने के लिए दोनों पहलुओं को उच्च प्रतिबिंब फिल्मों के साथ लेपित करने की आवश्यकता होती है, हालांकि आउटपुट पावर कम हो जाती है। उच्च वॉल प्लग दक्षता (डब्ल्यूपीई) बनाए रखने और उच्च आउटपुट पावर प्राप्त करने के लिए, सामने के पार्श्व की परावर्तनशीलता को एक अनुकूलित मूल्य तक कम करना होगा।

चित्र 24. नीला हरा लेजर डायोड

एसएसपीएल में प्रसंस्करण संबंधी सभी मुद्दों के समाधान के लिए अनुसंधान किया जा रहा है। हाल ही में, गैलियम नाइट्राइड–आधारित एकल उत्सर्जक लेजर डायोड का निर्माण किया गया है और CW और पल्स मोड में लेजिंग क्रिया को साकार किया गया है (चित्र 24)। चित्र 25 और 26 निर्मित लेजर डायोड के स्पेक्ट्रम और एल–आई विशेषताओं को दिखाते हैं। लेजर उत्सर्जन का 410nm तरंग दैर्ध्य पर निरीक्षण गया।



चित्र 25 लेजर डायोड उपकरण के स्पेक्ट्रम



चित्र 26. L-I लेजर डायोड की एल-आई विशेषताएँ

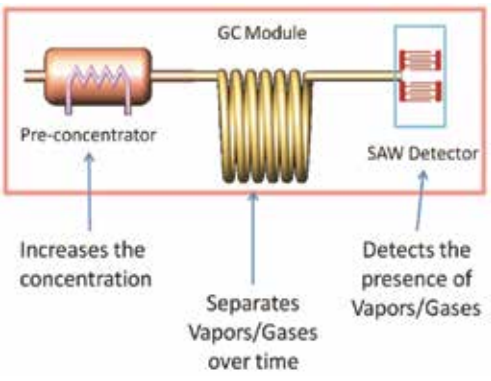
CW में 100 मेगावाट से अधिक पावर और >1W पीक पावर स्पंदित मोड हासिल किया गया है। गैलियम नाइट्राइड–आधारित नीले हरे लेजर डायोड के विकास के लिए आगे का काम प्रगति पर है।

सेंसर प्रौद्योगिकी

हमारे सशस्त्र बलों को किसी भी प्रकार की युद्धक्षेत्र स्थितियों से निपटने के लिए बेहतर ढंग से सुसज्जित करने के लिए जहां किसी भी रासायनिक या जैविक एजेंटों या विनाशकारी विकिरण का प्रकोप होता है, ऐसे सेंसर विकसित करने और बनाने की आवश्यकता है जो संवेदनशीलता और चयनात्मकता की सीमाओं को आगे बढ़ाते हैं। रासायनिक जैविक विकिरण और परमाणु (सीबीआरएन) सेंसर के अलावा अन्य भौतिक सेंसर जैसे पानी के नीचे ध्वनिक सेंसर समय की मांग हैं। अगली पीढ़ी के सेंसर आकार में छोटे और कम विद्युत खपत के अलावा अधिक संवेदनशील और विश्वसनीय होने की उम्मीद है। भविष्य की प्रणालियों में स्थितिजन्य जागरूकता अधिक होने की उम्मीद है। इसके लिए मौजूदा उपकरणों के प्रदर्शन में सुधार और नए एप्लिकेशन क्षेत्रों की खोज की आवश्यकता है, जिनके बारे में पहले नहीं सोचा गया।

रासायनिक युद्ध एजेंट डिटेक्टर-ई-नासिका

एसएसपीएल ने एनबीसी कार्यक्रम के तहत केमिकल वारफेयर एजेंटों (सीडब्ल्यूए) के लिए एक मजबूत, हैंडहेल्ड इलेक्ट्रॉनिक नाक वाष्प डिटेक्टर विकसित किया है, जिसे ई–नासिका के नाम से जाना जाता है। ई–नासिका प्रणाली एक एसएडब्ल्यू–जीसी (गैस क्रोमैटोग्राफी) आधारित प्रणाली है जो सरीन, सोमन, टैबुन, वीएक्स, लुईसाइट (जी एजेंट), सल्फर मस्टर्ड (एच एजेंट), फॉसजीन (चोकिंग एजेंट), हाइड्रोजन साइनाइड (रक्त एजेंट) और अन्य एजेंट जैसे घातक सीडब्ल्यूए का कम पीपीबी में सांद्रता और एक मिनट से भी कम समय में पता लगाने में सक्षम है। विकसित प्रणाली का परीक्षण और प्रमाणन एनबीसी के क्षेत्र में एक स्वतंत्र परीक्षण और प्रमाणन एजेंसी टीएनओ, नीदरलैंड द्वारा किया गया है। सिस्टम ने सेवाओं द्वारा निर्धारित JSQR प्रदर्शन मानदंड को पूरा किया है। (चित्र 27)।



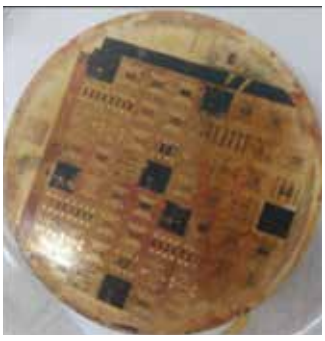
चित्र 27. ई-नासिका

सीएनटी-आधारित हैंड हेल्ड केमिकल डिटेक्टर-n-नासिका का विकास

अधिकांश विस्फोटक उपकरण (आईईडी) नाइट्रो–एरोमैटिक यौगिकों पर आधारित होते हैं और विस्फोट होने पर NO_X छोड़ते हैं। इसके अलावा उग्रवाद में इस्तेमाल होने वाले आम आईईडी अमोनियम नाइट्रेट से बने होते हैं, जो NO_2 और NH_3 छोड़ते हैं। इसलिए इन गैसों का पता लगाने के लिए उच्च संवेदनशीलता वाले सेंसर की आवश्यकता होती है।

एसएसपीएल NH_3 और NO_2 के पीपीटी स्तर का पता लगाने के लिए सीएनटी–आधारित गैस सेंसर (सीबीएस) विकसित कर रहा है। सीबीएस अगली पीढ़ी के सेंसर हैं जिनमें अल्ट्रा–उच्च संवेदनशीलता, कमरे के तापमान संचालन, ट्यून करने योग्य चयनात्मकता और लघुकरण में आसानी है।

सीएनटी सेंसरों के ऐरे 2 इंच छिद्रपूर्ण एल्यूमिना सब्सट्रेट पर बनाए गए हैं, जिसमें प्रति सब्सट्रेट लगभग 40 से 50 उपकरण हैं (चित्र 28 ए) 4 मिमी X 4 मिमी के आकार वाला प्रत्येक उपकरण वास्तव में 4–8 तत्वों से युक्त एक ऐरे है (चित्र 28 बी)। लक्ष्य विश्लेषण गैसों के लिए चयनात्मकता प्राप्त करने के लिए ऐरे के प्रत्येक तत्व को व्यक्तिगत रूप से कार्यात्मक बनाया गया है। सेंसर आवास के लिए एक गैस सेल डिजाइन किया गया है, जिसमें गैस इनलेट और आउटलेट है और गैस अवशोषण के लिए यूवीएलईडी और हीटर से सुसज्जित है, तथा गैस सेंसर पर्यावरण स्थितियों को नियंत्रित करने के लिए दबाव, आर्द्रता और तापमान सेंसर भी है। (चित्र 28 सी)।



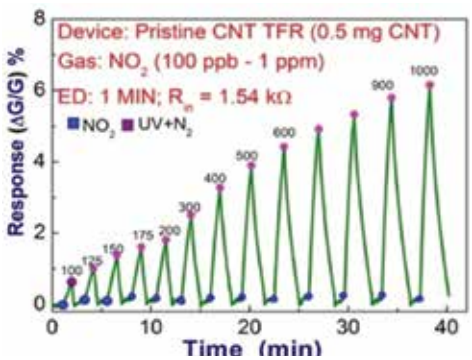
चित्र 28 (ए). 50 डिवाइस ऐरे के साथ 2 इंच एल्यूमिना मेम्ब्रेन की छवि

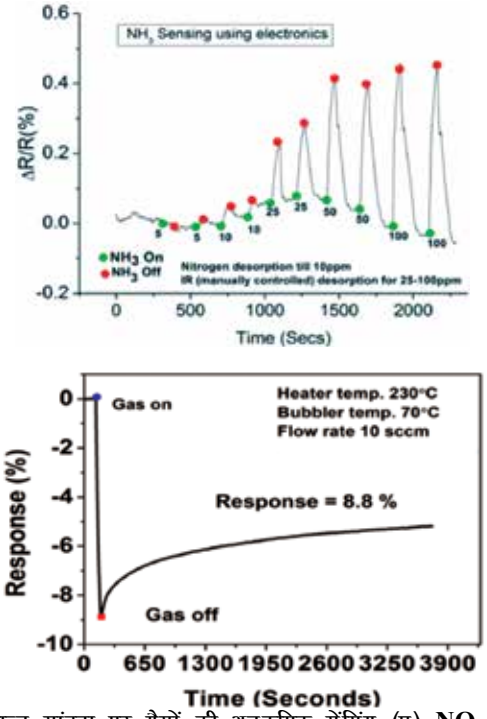
चित्र 28 (बी)

चित्र 28 (सी)

चित्र 28 (बी). 8 फिंगर डिवाइस ऐरे की छवि (सी) गैस सेल का योजनाबद्ध आरेख

आरडीनो–आधारित माइक्रोकंट्रोलर का उपयोग करके संपूर्ण सेंसिंग एप्लिकेशन का पूर्ण स्वचालन, जिसमें अनुक्रमिक गैस अवशोषण और अवशोषण, माइक्रोपंप और वाल्व जैसे बाह्य उपकरणों की स्वचालित स्विचिंग और एडीसी/डीएक्यू प्रणाली का उपयोग करके एमएफसी का नियंत्रण शामिल है, इन–लैब प्रशिक्षण और सेंसर के अंशांकन के लिए विकसित किया गया है। परिधीय और इलेक्ट्रॉनिक घटकों का संचालन (जैसा कि ऊपर बताया गया है) माइक्रोकंट्रोलर डिजिटल पिन से ड्राइवर आईसीएस के डिजिटल स्विचिंग के माध्यम से नियंत्रित किया जाता है। सिस्टम में फ्रंट एंड, 5 अंकों की बेहतर सटीकता के साथ स्वचालित डेटा अधिग्रहण के लिए 24 बिट एडीसी से युक्त है। इस उद्देश्य के लिए रतिमितीय विन्यास लागू किया गया है। गैस अवशोषण/विशोषण के कारण प्रतिरोध में परिवर्तन का मूल्य माइक्रोकंट्रोलर से कंप्यूटर तक प्राप्त किया गया था। इस प्रणाली का उपयोग नियमित रूप से विभिन्न सांद्रता पर NO_2 (चित्र 29ए) और NH_3 (चित्र 29बी) जैसी गैसों की क्रमिक रूप से स्वचालित सेंसिंग के लिए किया गया। इसके अलावा इस प्रणाली का परीक्षण अमोनियम नाइट्रेट जैसे विस्फोटक यौगिकों का पता लगाने के लिए भी किया गया था, जो आमतौर पर विस्फोटकों में उपयोग किया जाता है। (चित्र 29 सी)





चित्र 29. विभिन्न सांद्रता पर गैसों की अनुक्रमिक सेंसिंग (ए) NO_2 के लिए और (बी) NH_3 के लिए (सी) अमोनियम नाइट्रेट की सेंसिंग के लिए सेंसर की प्रतिक्रिया

ऑन–फील्ड पहचान के लिए NO_2 और NH_3 का पता लगाने के लिए एक पूर्ण हाथ से संचालित प्रोटोटाइप विकसित किया गया है। यह प्रोटोटाइप एन–नासिका (चित्र 30) विभिन्न प्रदर्शनियों के साथ–साथ डेफएक्सपो और एयरो इंडिया के दौरान प्रदर्शित किया गया।

चित्र 30. एन–नासिका–स्वचालित हैंडहेल्ड सीएनटी–आधारित गैस सेंसर

एसीएडीए

एसएसपीएल ने स्वचालित रासायनिक एजेंट मॉनिटर और अलार्म (एसीएडीए) प्रणाली भी विकसित की है, जो वर्तमान ई–नासिका प्रणाली का संशोधित संस्करण है। प्रणाली में एक रिमोट डिस्प्ले यूनिट है जिसे केबल के माध्यम से जोड़ा जा सकता है और दूर से संचालित किया जा सकता है। रिमोट डिस्प्ले में सभी प्रणाली डिस्प्ले सुविधाएँ शामिल हैं और यह मुख्य एसीएडीए प्रणाली से 1 किमी की दूरी पर रह सकता है। ई–नासिका और एसीएडीए दोनों में सेंसिंग तकनीक और विशिष्टताएं समान हैं। (चित्र 31)।

चित्र 31 एसीएडीए

प्रौद्योगिकी निर्णायक

पारंपरिक जीसी प्रतिक्रिया समय को लगभग 20 मिनट से घटाकर 30 सेकंड करके, तेज गैस क्रोमैटोग्राफी ऑपरेशन की प्राप्ति के साथ प्रौद्योगिकी में सफलता हासिल की गई। दोनों उत्पाद डिटेक्टर के रूप में एसएडब्ल्यू उपकरण के साथ लघु जीसी मॉड्यूल का उपयोग करते हैं।

प्रमुख प्रौद्योगिकी उपलब्धियाँ और उनके विवरण हैं:

- यौगिक का पता लगानाः सभी यौगिकों का पता समग्र रूप से लगाया जाता है, न कि उसके घटक तत्वों द्वारा।
- एक साथ पता लगानाः सभी लक्षित यौगिक एक ही बार में एक साथ। कोई मोड परिवर्तन की आवश्यकता नहीं है। जी, एच, बी, सी और टीआईसी/टीआईएम के लिए एकल इकाई।
- भौतिक परिवर्तनों के प्रति असंवेदनशीलताः एसएडब्ल्यू ई–नासिका में तापमान, दबाव/प्रवाह आंतरिक रूप से नियंत्रित होता है। बाहरी भिन्नताएँ प्रतिक्रिया को प्रभावित नहीं करतीं। आर्द्रता को एक अलग यौगिक के रूप में पाया जाता है।
- संतृप्ति प्रमाणः पीपीबी से बहुत उच्च सांद्रता का पता लगाता है और जल्दी ही सामान्य स्थिति में लौट आता है।
- वाइड कंपाउंड लाइब्रेरीः बड़े लाइब्रेरी कंपाउंड संभव हैं।
- कम गलत अलार्मः जीसी और कंपाउंड डिटेक्शन के उपयोग से बेहतर चयनात्मकता और कम गलत अलार्म होता है।
- स्वदेशी तकनीकः >70% स्वदेशी।

संभावित अनुप्रयोग

विस्फोटक पहचान के विकास में प्रौद्योगिकी का संभावित अनुप्रयोग है। यह अर्धसैनिक बलों, एनडीआरएफ, एनएसजी, एसपीजी आदि जैसी घरेलू भूमि सुरक्षा एजेंसियों के लिए बल गुणक के रूप में कार्य करेगा।

यौगिकों का पता लगा	तंत्रिका (टैबुन, सरीन, सोमन, साइक्लोसेरिन, वीएक्स), ब्लिस्टर (सल्फर, सरसों, लेविसाइट), रक्त (हाइड्रोजन साइनाइड), चॉकिंग (फॉसजीन), टीआईसी / टीआईएम
पहचान	स्वचालित
पता लगाने का समय	12 to 55 sec
संवेदनशीलता	सरीन: 0.05 mg/m^3, सल्फर सरसों: 0.5 mg/m^3, एचसीएन: 20 mg/m^3, फॉस्जीन: 20 mg/m^3
अलार्म	श्रव्य एवं दृश्य
आकार	30 x 10.5 x 12 cm^3
वजन	3 kg बैटरी के साथ
संचालन	> 8 घंटे लगातार
दृढता	JSS55555 & MIL STD 461E

ध्वनिक सेंसर

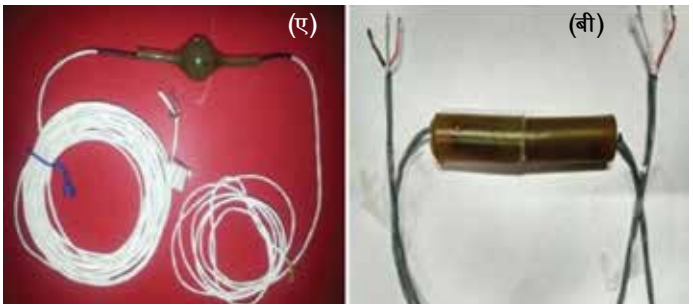
एसएसपीएल ने एनएमआरएल के सहयोग से नौसेना और समुद्री प्रणालियों के लिए लघु, अत्यधिक संवेदनशील, सर्वदिशात्मक एफईटी इनपुट–पीजो–आधारित ध्वनिक सेंसर के निर्माण के लिए पूरी तरह से स्वदेशी तकनीक को डिजाइन, विकसित और मानकीकृत किया है। इन सेंसरों के लिए प्रौद्योगिकी 1–3 पीजोकंपोजिट / पीवीडीएफ / पीज़ेडटी सेंसिंग तत्व की निकटता में हाइब्रिड इंटरफेस इलेक्ट्रॉनिक्स का उपयोग करके विकसित की गई है, दोनों ध्वनिक रूप से पारदर्शी पॉलीयूरेथेन (पीयू) / एपॉक्सी में समाहित हैं। यह विभिन्न अनुप्रयोगों के लिए वांछनीय फ्लैट आवृत्ति और सर्वदिशात्मक प्रतिक्रिया के साथ लघु, कम लागत, हल्के वजन, उच्च संवेदनशीलता ध्वनिक सेंसर प्रदान करने में सक्षम है। इन ध्वनिक सेंसरों का ध्वनिक परीक्षण सुविधा–एनएसटीएल विजाग, एनआईओटी, चेन्नई और एनपीओएल में वोल्टेज संवेदनशीलता और प्रत्यक्षता प्राप्त करने और एमएटीएस सुविधा एनपीओएल में तापमान सहनशीलता के लिए बड़े पैमाने पर मूल्यांकन किया गया था। अनुमानित क्यूआर और सिस्टम एप्लिकेशन के संदर्भ में परीक्षण के लिए नौसेना और समुद्री प्रणालियों के लिए विनिर्देशों को पूरा करने वाले एकल–तत्व लघु ध्वनिक सेंसर और ऐरे उपयोगकर्ता को प्रदान किए गए।

एकल तत्व मोबाइल डिकॉय ध्वनिक सेंसर

मोबाइल डिकॉय ध्वनिक सेंसर (चित्र 32) आने वाले टारपीडो का पता लगाने में सक्षम है। मोबाइल डिकॉय अपने उन्नत परिष्कृत काउंटर–माप एल्गोरिदम के साथ दुश्मन टारपीडो को नौसेना प्लेटफॉर्म पर हमला करने से रोकने के लिए लंबे और जिगजैग कोर्स में चलकर टॉरपीडो की ऊर्जा को समाप्त करके नौसेना प्लेटफॉर्म की रक्षा करने में मदद करता है। चित्र 32 (ए) में दिखाए गए अनुसार आवृत्ति बैंड (15 किलोहर्ट्ज से 85 किलोहर्ट्ज) में रिसीविंग वोल्टेज सेंसिटिविटी (आरवीएस) –170 डीबी रे 1V/µPa (±2dB) वाले मोबाइल डिकॉय के लिए ध्वनिक सेंसर और 100 नग एनएसटीएल को वितरित किए गए थे।

एयूवी अनुप्रयोग के लिए थिन लाइन टोड (टीएलटीए) ऐरे ध्वनिक सेंसर

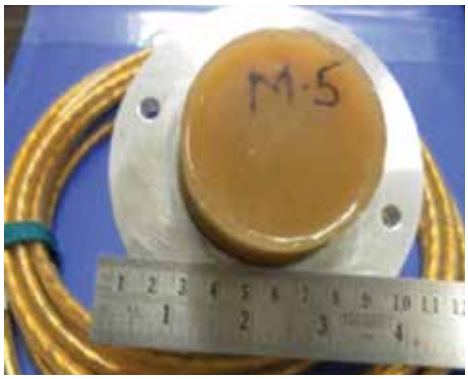
एक ऑटोनॉमस अंडरवाटर व्हीकल (एयूवी) इंटेलिजेंस, सर्विलांस और री–कनाइसेंस (आईएसआर) का कार्य करता है। पीज़ेडटी माइक्रो ट्यूब सेंसिंग तत्व की निकटता में पूरी तरह से विभेदक हाइब्रिड इंटरफेस इलेक्ट्रॉनिक्स का उपयोग करके लघु टीएलटीए (चित्र 32 बी) ध्वनिक सेंसर के लिए प्रौद्योगिकी विकसित की गई है, दोनों टीएलटीए के लिए ध्वनिक रूप से पारदर्शी पॉलीयूरेथेन (पीयू) में समाहित हैं और रबर ध्वनिक टाइल्स में एम्बेडेड अनुप्रयोग एयूवी पर फिट किए गए हैं।



चित्र 32. (ए) एकल तत्व मोबाइल डिकॉय
(बी) टीएलटीए ध्वनिक सेंसर

अंतर्जलीय खानों के लिए ध्वनिक सेंसर

माइंस का पता लगाने के लिए ध्वनिक सेंसर (चित्र 33) आवृत्ति बैंड (2–20 किलोहर्ट्ज) में वोल्टेज संवेदनशीलता (आरवीएस) –170 डीबी रे 1V/µPa (±2dB) और सर्व दिशात्मक (क्षैतिज विमान) प्रतिक्रिया वाले अनुप्रयोग को विकसित कर एनएसटीएल को सौंप दिया गया।



चित्र 33. माइंस

दबी हुई वस्तुओं के स्कैनिंग सोनार के लिए ध्वनिक सेंसर

बरीड ऑब्जेक्ट स्कैनिंग सोनार (बीओएसएस) का उपयोग समुद्र तल पर इमेजिंग के दौरान खनिजों के लिए किया जाता है। इसका उपयोग खदान खोजने के लिए भी किया जा सकता है। एसएसपीएल ने एनआईओटी के सहयोग से 2–30 किलोहर्ट्ज आवृत्ति रेंज में बीओएसएस के लिए ध्वनिक सेंसर विकसित किया है, जिसमें संवेदनशीलता आरवीएस=–165 डीबी रे 1V/µPa है, फ्लैट और सर्वदिशात्मक प्रतिक्रिया के साथ जैसा कि चित्र 34 में दिखाया गया है।

चित्र 34. बीओएसएस ध्वनिक सेंसर

समुद्र के परिवेशी शोर माप के लिए सेंसर ऐरे। 12–तत्व परिवेश शोर माप ध्वनिक सेंसर ऐरे (चित्र 35) का पीयू (100 हर्ट्ज–30 किलोहर्ट्ज) में प्रावरण किया गया है, जिसमें संवेदनशीलता आरवीएस = – 170 डीबी रे 1V/µPa, फ्लैट और सर्वदिशात्मक प्रतिक्रिया के साथ अभिकल्पित, विकसित और वितरित किया गया है।

चित्र 35. 12-तत्व ध्वनिक सेंसर ऐरे

हिमस्खलन भविष्यवाणी अनुप्रयोगों के लिए पीजो-आधारित स्वदेशी एई सेंसर और डीएक्यू प्रणाली

एसएसपीएल ने एनएमआरएल और डीजीआरई के सहयोग से मजबूत, उच्च संवेदनशीलता (–30dB @1V/µbar से बेहतर), चौड़ी बैंडविड्थ (20–80 kHz), हिमस्खलन पूर्वानुमान अनुप्रयोग के लिए एकदिशीय एई सेंसर और एई अधिग्रहण और विश्लेषण (डीएक्यु) प्रणाली के निर्माण के लिए स्वदेशी तकनीक विकसित की है (चित्र 36 ए)। स्वदेशी एई सेंसर में 1–3 पीजोकंपोजिट सेंसिंग तत्व होते हैं और इसमें 26 डीबी इंटीग्रल प्री–एम्प्लीफायर गेन होता है। स्वदेशी डीएक्यू प्रणाली में 32/16–एई चौनल हैं जो 1 एमएसपीएस अधिकतम नमूना दर, एई सिग्नल से कई एई पैरामीटर निष्कर्षण (आयाम, गणना, एई ऊर्जा, शिखर और औसत आवृत्ति, पल्स अवधि, आदि) और ऑपरेटिंग तापमान –20 डिग्री सेल्सियस से 55 डिग्री सेल्सियस तक रेंज में सक्षम हैं।

कैप्चर किए गए एई तरंगरूप को (चित्र 36 बी) में दिखाया गया है। स्वदेशी एई सेंसर प्रणाली में विभिन्न इस्पात और कंक्रीट निर्माणों और संरचनाओं के संरचनात्मक स्वास्थ्य निगरानी (एसएचएम), रिसाव का पता लगाने, जंग का पता लगाने, विमान की संरचनात्मक अखंडता की निगरानी और दबाव पोत एसएचएम आदि के क्षेत्र में संभावित अनुप्रयोग हैं।

(ए)

(बी)

चित्र 36. (ए) स्वदेशी एई सेंसर और एई डीएक्यू प्रणाली (बी) निष्कर्षित एई पैरामीटर के साथ कैप्चर एई तरंगरूप

एई सेंसर (320 नग) और डीएक्यू सिस्टम (08 नग) को मनाली–लेह अक्ष (धुंडी और पात्सियो, एचपी) और जम्मू–कश्मीर (बनिहाल टॉप) पर विभिन्न हिमस्खलन संभावित स्थलों पर सफलतापूर्वक वितरित और तैनात किया गया। एई सेंसर प्रणाली इन हिमस्खलन संभावित स्थलों पर 24X7 मोड में काम कर रही है और एई डेटा एकत्र कर रही है। हिम हिमस्खलन भविष्यवाणी मॉडल विकसित करने के लिए डीजीआरई द्वारा डेटा का विश्लेषण किया जाएगा। एसएसपीएल ने एई सेंसर के लिए मेसर्स कैनोपस इंस्ट्रूमेंट्स, ठाणे और एई अधिग्रहण एवं विश्लेषण (डीएक्यू) प्रणाली के लिए मेसर्स डिजीलॉजिक सिस्टम्स प्राइवेट लिमिटेड हैदराबाद को सफलतापूर्वक प्रौद्योगिकी हस्तांतरित की।

सेंसरों के लिए भविष्य की योजनाएँ

भूस्खलन पूर्व चेतावनी प्रणाली- एई प्रौद्योगिकी आधारित

एसएसपीएल ने अपनी पुर्व परियोजनाओं से स्वदेशी एई सेंसर और डीएक्यू सिस्टम के अभिकल्पन और विकास में अनुभव प्राप्त किया। अनुभव का उपयोग भूस्खलन की घटनाओं की निगरानी के लिए एई सेंसर सिस्टम विकसित करने और वास्तविक भूस्खलन घटना के लिए एई व्यवहार के रुझानों का विश्लेषण करने के लिए किया जाएगा। एकत्रित एई डेटा के विश्लेषण के बाद मशीन लर्निंग विधियों और कृत्रिम बुद्धिमत्ता का उपयोग भूस्खलन प्रारंभिक चेतावनी प्रणाली (एलईडब्ल्यूएस) के लिए एक एल्गोरिदम विकसित करने के लिए किया जाएगा।

स्वदेशी ध्वनिक वेक्टर सेंसर का डिजाइन और विकास

ध्वनिक वेक्टर सेंसर (एवीएस) का उपयोग विभिन्न अनुप्रयोगों जैसे आगमन की दिशा का अनुमान, इन्फ्रासोनिक सेंसिंग आदि के लिए किया जा सकता है। एसएसपीएल एवीएस के विकास की दिशा में काम कर रहा है।

ब्लास्ट सेंसर

एसएसपीएल पीजोइलेक्ट्रिक तत्व पर आधारित स्वदेशी दबाव सेंसर के विकास पर काम कर रहा है। ब्लास्ट सेंसर का उपयोग विभिन्न शॉक तरंगों का पता लगाने, विस्फोट या विस्फोटक परीक्षण के लिए किया जाएगा।

इन्फ्रासोनिक सेंसर

एसएसपीएल इन्फ्रासोनिक सेंसर के डिजाइन और निर्माण में शामिल है। इन्फ्रासोनिक सेंसर का विशिष्ट अनुप्रयोग विभिन्न घटनाओं जैसे हिमस्खलन, वायु अशांति का पता लगाना और भूकंप गतिविधियों आदि के लिए इन्फ्रासोनिक तरंगों का पता लगाना और उन्हें पकड़ना होगा।

एसएडब्ल्यू-आधारित ई-नासिका

एसएडब्ल्यू–आधारित ई–नासिका प्रणाली की तकनीकी उपलब्धियों का उपयोग रणनीतिक और सार्वजनिक महत्व के स्थानों में उपयोग के लिए 24X7 संचालित सीडब्ल्यूए डिटेक्टर विकसित करने और वाहन माउंट सीडब्ल्यूए निगरानी के लिए किया जाएगा।

सीएनटी-आधारित गैस सेंसर

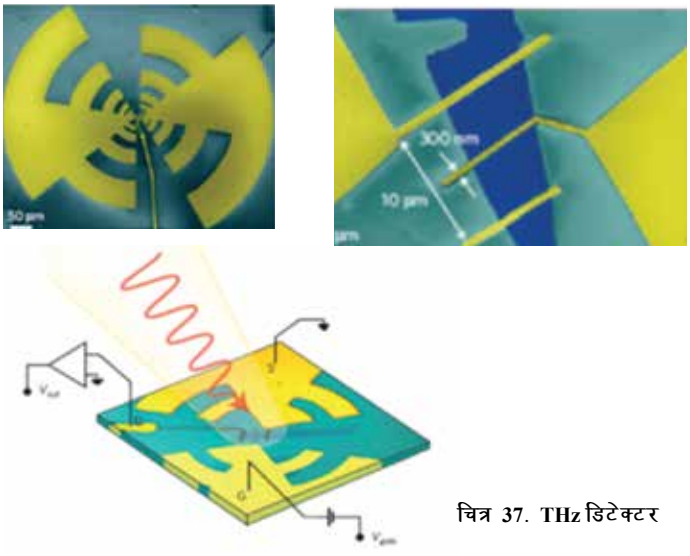
सीएनटी–सेंसर प्रशिक्षण और कृत्रिम बुद्धिमत्ता सॉफ्टवेयर का उपयोग करने के बाद आगे का रास्ता सेंसर मॉड्यूल का उपयोग विभिन्न प्रकार के विस्फोटकों, सीडब्ल्यूए और ई–नोज जैसी अन्य जहरीली गैसों की स्क्रीनिंग के लिए किया जाएगा।

एमईएमएस-आधारित ध्वनिक वेक्टर सेंसर

आने वाले ध्वनिक सिग्नल के आगमन की दिशा का अनुमान लगाने के लिए स्वदेशी रूप से विकसित एवीएस का उपयोग किया जाएगा। विशिष्ट अनुप्रयोगः गनशॉट स्थानीयकरण।

THz प्रौद्योगिकी

एसएसपीएल ने अपनी उच्च वाहक गतिशीलता, शून्य बैंडगैप और सभी THz आवृत्ति में मजबूत इंटरबैंड अवशोषण के कारण ग्राफीन का उपयोग करके THz डिटेक्टर विकसित करने की योजना बनाई है जो वाइडबैंड THz डिटेक्शन प्रदान करता है। गैर–आयनीकरण विकिरणों के कारण THz इमेजिंग मातृभूमि सुरक्षा के लिए बहुत प्रासंगिक है। THz स्पेक्ट्रोस्कोपी विस्फोटकों, सीडब्ल्यूए और अन्य सामग्रियों के अद्वितीय फिंगरप्रिंट प्रदान करता है। (चित्र 37)



चित्र 37. THz डिटेक्टर

समुद्री जल के कार्य के रूप में नीले/हरे लेजर के प्रसार का अध्ययन

अंतर्जलीय खदानों, अंतर्जलीय संचार, एयूवी/यूयूवी पनडुब्बी संचार और नीले/हरे लेजर तकनीक पर आधारित अशांति का पता लगाने वाली प्रणालियों की भविष्य की उभरती आवश्यकता समुद्री वातावरण में नीले/हरे लेजर के प्रसार के लिए विस्तृत प्रयोगात्मक डेटा/वास्तविक समय डेटा की मांग करती है।

उपरोक्त को ध्यान में रखते हुए एसएसपीएल ने जल पैरामीटर के कार्य के रूप में नीले/हरे लेजर पैरामीटर के प्रसार के विस्तृत प्रयोगात्मक अध्ययन की योजना बनाई है, उदाहरण के लिए लवणता, चालकता, मैलापन, कार्बनिक पदार्थ, तापमान, दबाव इत्यादि। यह अध्ययन नीले/हरे लेजर–आधारित सिस्टम मापदंडों को अनुकूलित करने में मदद करेगा।

शीतलन प्रौद्योगिकियाँ

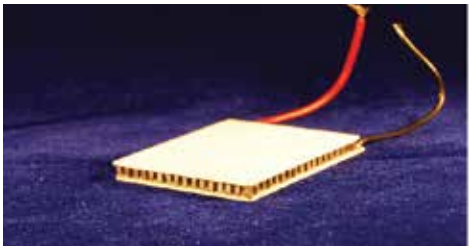
थर्मोइलेक्ट्रिक कूलर प्रौद्योगिकी

थर्मोइलेक्ट्रिक कूलर पेल्टियर प्रभाव पर आधारित ठोस अवस्था वाले शीतलन उपकरण हैं जो डीसी वोल्टेज के अनुप्रयोग पर स्थानीयकृत शीतलन या गर्माहट प्रदान कर सकते हैं। इन उपकरणों को लेजर डायोड, इन्फ्रारेड एफपीए और अन्य सेंसर जैसे सक्रिय उपकरणों के शीतलन और तापमान स्थिरीकरण के लिए रक्षा प्रणालियों और उप–प्रणालियों में व्यापक उपयोग मिलता है।

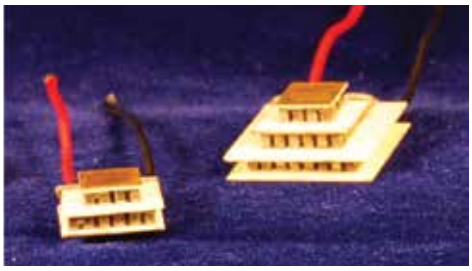
एसएसपीएल ने Bi2Te3 मिश्र धातुओं पर आधारित सिंगल स्टेज थर्मोइलेक्ट्रिक कूलर मॉड्यूल के डिजाइन और निर्माण के लिए तकनीक विकसित की है। संपूर्ण प्रौद्योगिकी विकास में थर्मोइलेक्ट्रिक सामग्री अनुकूलन, उपकरण डिजाइन और प्रदर्शन सिमुलेशन, तथा विश्वसनीय एवं पुनरुत्पादित रूप से कूलर मॉड्यूल के निर्माण के लिए प्रक्रिया अनुक्रम का मानकीकरण शामिल है। पी–टाइप और एन–टाइप बिस्मथ टेलुराइड मिश्र धातु के पॉलीक्रिस्टलाइन सिल्लियां, जिनकी योग्यता का आंकड़ा > 2-5 X 10^{-3} /K है, ऊर्ध्वाधर दिशात्मक फ्रीजिंग का उपयोग करके उगाए गए थे। मॉड्यूल को उपयोगकर्ता की आवश्यकताओं के आधार पर विभिन्न घरेलू अनुप्रयोगों के लिए डिजाइन किया गया है। संपूर्ण प्रक्रिया अनुक्रम, जिसमें कई उप–प्रौद्योगिकियां शामिल हैं जैसे धातुकृत एल्यूमिना सब्सट्रेट का विकास, लघु थर्मो–तत्वों का विकास, डिमाउंटेबल असेंबली जिग्स का डिजाइन, मॉड्यूल असेंबली के लिए सोल्डरिंग प्रक्रियाओं का अनुकूलन और मॉड्यूल विशेषताओं का परीक्षण अनुकूलित किया गया है।

सिंगल स्टेज TE कूलर मॉड्यूल (चित्र 38) को लेजर डायोड के शीतलन/तापमान स्थिरीकरण, Ti–आधारित माइक्रो–बोलोमीटर सरणियों, InGaAs–आधारित एसडब्ल्यूआईआर डिटेक्टरों, शीत परिधानों आदि जैसे अनुप्रयोगों के लिए विकसित किया गया है। 10X10 से 50X50 वर्ग मिमी तक के आकार वाले और 1 वाट से 30 वाट की रेंज में गर्मी पंप करने में सक्षम कूलर मॉड्यूल को आवश्यकता के अनुसार डिजाइन और निर्मित किया गया है। इन मॉड्यूल की ऑपरेटिंग धाराएँ 250 mA से 10A की सीमा में हैं। पूरे डिवाइस में 64K तक का अधिकतम तापमान अंतर प्राप्त किया जा सकता है। एक उद्योग भागीदार के साथ इंटरफेस के माध्यम से उपकरण संख्या का स्केल अप हासिल किया गया है।

उच्च तापमान अंतर (>64K) प्राप्त करने के लिए मल्टी–स्टेज TE कूलर मॉड्यूल (चित्र 39) विकसित किए गए हैं। यह विकास उपयोगकर्ता की आवश्यकताओं के आधार पर किसी भी एप्लिकेशन के लिए इष्टतम मॉड्यूल को कस्टम डिजाइन करना और उन्हें स्वदेशी रूप से बनाना संभव बनाता है।



चित्र 38. सिंगल स्टेज कूलर



चित्र 39. मल्टी-स्टेज कूलर

Bi2Te3 मिश्र धातु आधारित नैनोकम्पोजिट का विकास

बल्क Bi2Te3 पर आधारित सिंगल–स्टेज और मल्टी–स्टेज TE कूलर के लिए प्रौद्योगिकी के सफल विकास के बाद, Bi2Te3 आधारित नैनो–कंपोजिट के विकास पर काम शुरू किया गया। कम तापमान पर थर्मोइलेक्ट्रिक सामग्रियों की योग्यता के आंकड़े (जेडटी) को बढ़ाने के लिए, हाल के काम में बड़े पैमाने पर नैनो–कंपोजिट पर ध्यान केंद्रित किया गया है जिसमें थर्मोइलेक्ट्रिक मैट्रिक्स और बिखरे हुए नैनो–आकार के कण शामिल हैं। एसएसपीएल ने थर्मोइलेक्ट्रिक नैनो–कंपोजिट की तैयारी और थर्मोइलेक्ट्रिक लक्षण वर्णन के लिए एक सुविधा स्थापित की है। इस विकास कार्य को मोटे तौर पर निम्नलिखित में विभाजित किया जा सकता है:

नैनो-कंपोजिट की तैयारी और थर्मोइलेक्ट्रिक विशेषता

- नैनो समावेशन के साथ या उसके बिना बॉल मिलिंग द्वारा मिश्र धातु मैट्रिक्स के नैनो–आकार के पाउडर की तैयारी
- अनुकूलित परिस्थितियों में एनीलिंग के बाद बेलनाकार छर्रों में नैनोपाउडर का संघनन
- 150–350K के तापमान पर थर्मोइलेक्ट्रिक गुणों का विवरण

प्रोटोटाइप टीई कूलर मॉड्यूल का निर्माण और परीक्षण

- कम प्रतिरोध संपर्क प्रदान करने के लिए नैनो–मिश्रित नमूनों पर धातुकरण, जिसमें इलेक्ट्रोपॉलिशिंग, इलेक्ट्रोलेस Ni जमाव के बाद Ni इलेक्ट्रोप्लेटिंग के लिए प्रक्रियाओं का अनुकूलन शामिल है।
- थर्मो–तत्वों की तैयारी, यूनिट युगल निर्माण और उनका परीक्षण

नैनोसंरचित सामग्रियों की अवधारणा के आधार पर, मैट्रिक्स तत्व के रूप में बिस्मथ टेलुराइड के मिश्र धातुओं का उपयोग करके नवीन नैनो–कंपोजिट तैयार किए गए और उनके थर्मोइलेक्ट्रिक गुणों के लिए विशेषताएँ दी गई। नैनो–कंपोजिट के थर्मोइलेक्ट्रिक व्यवहार पर उनके प्रभाव का अध्ययन करने के लिए नैनो–आकार के समावेशन जैसे Si, Cu, SiC, CNTs और ग्राफीन को मैट्रिक्स के भीतर फैलाया गया। नैनो समावेशन के आकार, सांद्रता के साथ–साथ एनीलिंग स्थितियां अलग–अलग थीं, जिसके बाद थर्मोइलेक्ट्रिक मापदंडों और विभिन्न तापमानों पर योग्यता के आंकड़े का मूल्यांकन किया गया और थोक मिश्र धातुओं के साथ तुलना की गई।

नैनो–कंपोजिट तैयार करने के लिए, p प्रकार $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ और n प्रकार $Bi_2Se_{0.7}Te_{2.3}$ की अनुकूलित रचनाओं को संश्लेषित किया गया और नैनो आकार के पाउडर में पीसने के लिए प्लैनेटरी बॉल मिल (रेस्टच पीएम–100) के लिए फीड के रूप में उपयोग किया जाता है। पी और एन प्रकार के नैनो–कंपोजिट तैयार करने के लिए नैनो–संरचित मैट्रिक्स सामग्री में विभिन्न नैनो कणों, जैसे कि विभिन्न सांद्रता में Cu, Si, CNT और ग्राफीन को जोड़ा जाता है।

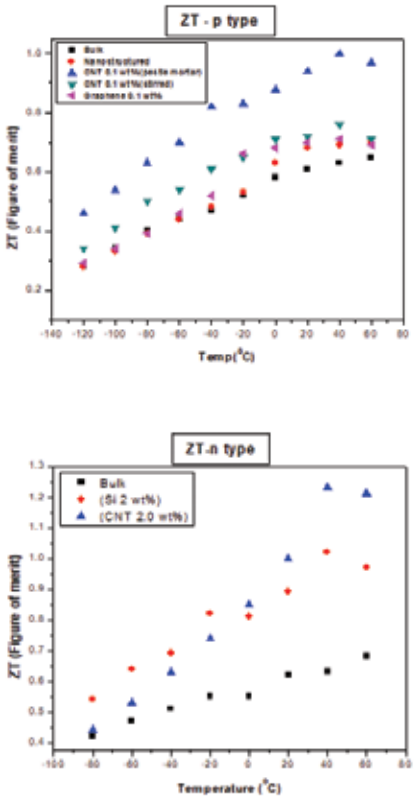
बॉल मिल्ड पाउडर को एक स्वचालित कोल्ड प्रेस का उपयोग करके वांछित मोटाई के साथ 13 मिमी और 20 मिमी व्यास के बेलनाकार छर्रों के रूप में कॉम्पैक्ट किया जाता है। पी और एन दोनों प्रकार के नैनो–कंपोजिट छर्रों में उच्च घनत्व और चिकनी फिनिश प्राप्त करने के लिए कॉम्पैक्टिंग प्रक्रिया को अनुकूलित किया गया। वांछित थर्मोइलेक्ट्रिक गुणों को प्राप्त करने के लिए इन छर्रों को अनुकूलित तापमान और अवधि पर सील और एनील्ड किया जाता है। ZEM-3L और XFA प्रणाली का उपयोग करके एनाल्ड नैनोकम्पोजिट नमूनों को उनके संरचनात्मक और थर्मोइलेक्ट्रिक गुणों के लिए आगे बढ़ाया गया।

नैनो–कंपोजिट के अध्ययन से पता चला है कि जैसी कि उम्मीद थी, नैनो–संरचना बिस्मथ टेलुराइड मिश्र धातुओं की तापीय चालकता में महत्वपूर्ण कमी लाती है। हालाँकि, सरल नैनो–संरचित नमूने बहुत अधिक प्रतिरोधकता दिखाते हैं, इसलिए समग्र Z में कमी आई है।

न्यूनतम मात्रा में नैनो–समावेशन (0.1 से 0.3 wt%) जोड़ने से इन नैनोकम्पोजिट में प्रतिरोधकता और सीबेक गुणांक में महत्वपूर्ण परिवर्तन आया। वास्तविक वृद्धि/कमी, नैनोसमावेशन प्रजातियों, उनके आकार, एकाग्रता और एनीलिंग स्थितियों पर निर्भर करती है। 150–300K तापमान रेंज में थर्मोइलेक्ट्रिक गुणों पर अलग–अलग सांद्रता वाले नैनो–समावेशन के रूप में 10–50 एनएम आकार के Cu, Si, SiC, MWCNT, ग्राफीन के प्रभाव का व्यवस्थित रूप से अध्ययन किया गया है।

इन अध्ययनों के आधार पर, कम तापमान पर उन्नत Z वाले पी और एन प्रकार के नैनो–कंपोजिट की पहचान की गई है। कम तापमान 150–300 K पर उन्नत थर्मोइलेक्ट्रिक मेरिट ऑफ मेरिट (ZT) सीएनटी (0.05 और 0.1 wt%) और ग्राफीन (0.4 wt%) के साथ नैनो–समावेशन के साथ पी प्रकार के नैनो–कंपोजिट में प्राप्त किया गया। एन–प्रकार के नैनो–कंपोजिट के लिए, कम तापमान पर ZT वृद्धि को CNT

(2wt%) और Si(0.2 wt%) के साथ नैनो–समावेशन (चित्र 40) के रूप में देखा गया था। एन–प्रकार के नैनो–कंपोजिट के लिए ज़ेडटी मूल्यों में और वृद्धि के लिए कार्य किया जाना है।



चित्र 40. नैनो-समावेशन

इसके अलावा, थर्मोकपल के निर्माण के लिए, इन नैनो–कंपोजिट पर अच्छे आसंजन के साथ Ni संपर्क प्राप्त करने पर पहली बार काम किया गया है। यह महत्वपूर्ण है क्योंकि अब तक, दुनिया भर में किसी भी शोध समूह ने इस क्षेत्र में सफलता नहीं प्राप्त की है। नैनो–कंपोजिट के लिए कम–प्रतिरोध धातु संपर्क प्राप्त करने के क्षेत्र में कुछ और काम करने की आवश्यकता है ताकि TE उपकरणों के प्रदर्शन में और सुधार हासिल किया जा सके।

उन्नत Z के साथ नैनो–कंपोजिट का उपयोग करके, प्रोटोटाइप TE कूलर का सफलतापूर्वक निर्माण और परीक्षण किया गया है। इन उपकरणों में अधिकतम तापमान अंतर (ΔT_{max})≃32-34 °C प्राप्त किया गया है। ये नैनो–कंपोजिट का उपयोग करके दुनिया भर में किसी भी समूह द्वारा रिपोर्ट किए गए पहले कूलर मॉड्यूल प्रदर्शन परिणामों में से एक हैं। इन उपकरणों में बेहतर ZT के प्रभाव को समझने के लिए Ni इंटरफेस के और अनुकूलन के साथ–साथ इसे प्राप्त करने के लिए नई धातु योजनाओं की खोज पर काम प्रगति पर है।

स्टर्लिंग क्रायोकूलर

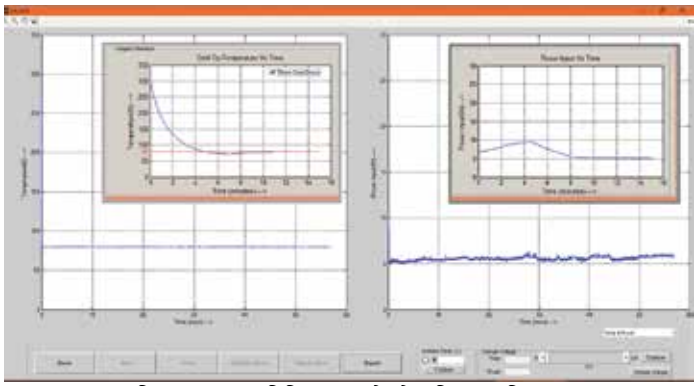
स्टर्लिंग क्रायोकूलर का उपयोग एसएसपीएल में विकसित किए जा रहे इन्फ्रारेड फोकल प्लेन एरेज (आईआरएफपीए) को ठंडा करने के लिए किया जाता है और यह व्यावसायिक रूप से उपलब्ध डिटेक्टर एरेज के लिए भी उपयुक्त है। इन आईआरएफपीए को उनके सामान्य संचालन के लिए 80K क्रम के क्रायोजेनिक तापमान पर बनाए रखना पड़ता है। क्रायोजेनिक तापमान यांत्रिक बंद चक्र स्टर्लिंग क्रायोकूलर द्वारा उत्पादित किया जाता है। ये क्रायोकूलर स्टर्लिंग साइकिल पर काम करते हैं और उच्च दक्षता, तेजी से ठंडा होने का समय, छोटे आकार, हल्के वजन और उच्च विश्वसनीयता की विशेषता रखते हैं।

एसएसपीएल ने इंटीग्रेटेड डिटेक्टर देवर कूलर असेंबली (आईडीडीसीए) कॉन्फिगरेशन के आधार पर रोटरी क्रैंक संचालित क्रायोकूलर की तकनीक विकसित की है। प्रोटोटाइप रैखिक ऐरे के साथ–साथ आईआरएफपीए प्रारूपों के लिए उपयुक्त है। क्रायोकूलर की तकनीकी जटिलता और लंबी अवधि के असफल–सुरक्षित संचालन की आवश्यकता के लिए करीबी सहनशीलता के साथ मजबूत डिजाइन, निर्माण और असेंबली और उप–प्रौद्योगिकियों की एक श्रृंखला की पूर्णता की आवश्यकता होती है। विकसित प्रोटोटाइप को मानक परीक्षण प्रोटोकॉल के अनुसार कई सौ घंटों की प्रयोगशाला परीक्षण के अधीन सफलतापूर्वक किया गया है। एक विशिष्ट प्रदर्शन परीक्षण का स्क्रीन–शॉट चित्र 41 में दिखाया गया है। इसे बीईएल–मछलीपट्टनम (चित्र 41) में व्यावसायिक रूप से उपलब्ध आईडीडीसीए मॉड्यूल के साथ एकीकृत और परीक्षण किया गया है और स्पष्ट थर्मल छवियां प्राप्त की गईं। ये प्रोटोटाइप विभिन्न सेंसर ऐरे प्रारूपों में आधुनिक थर्मल इमेजर्स के लिए उपयुक्त हैं और अत्याधुनिक हैं। स्वदेशी उत्पादन के लिए प्रौद्योगिकी (टीओटी) को बीईएल–मछलीपट्टनम में स्थानांतरित कर दिया गया है।

चित्र 41. स्टर्लिंग क्रायोकूलर प्रोटोटाइप

विशेषताएँ:

- शीतलन क्षमता : 0-5W @ 80K
- शीत फिंगर आकार : अधिकतम 8मिमी
- कूल–डाउन समय : <6 मिनट
- ड्राइव का प्रकार : ब्रशलेस डीसी मोटर
- फीडबैक नियंत्रण : हाँ
- अधिकतम इनपुट पावर : 20W
- स्थिर अवस्था इनपुट : 10W@ 80K
- वजन : <450 ग्राम



चित्र ४२. एक विशिष्ट नमूने के परिक्षण परिणाम (डीएक्यू स्क्रीन-शॉट)

चित्र ४३. क्रायोकूलर प्रोटोटाइप के साथ संलग्न HHTI

शीत-आईआर डिटेक्टरों के लिए स्व-विनियमन जेटी कूलर

देवर एक वैक्यूम एनकैप्सुलेशन है, जिसका उपयोग शीत–आईआर डिटेक्टरों की पैकेजिंग के लिए किया जाता है, जिसे लगभग 80K से 90K के क्रायोजेनिक तापमान पर संचालित करने की आवश्यकता होती है। देवार मूल रूप से डिटेक्टर को वायुमंडलीय गर्मी से बचाता है ताकि इसे आसानी से वांछित क्रायोजेनिक तापमान तक ठंडा किया जा सके और उसके बाद उस तापमान पर बनाए रखा जा सके, जब तक कि डिटेक्टर चालू रहे। आम तौर पर, इस उद्देश्य के लिए जूल थॉमसन (जेटी) कूलर का उपयोग किया जाता है, क्योंकि यह काफी कॉम्पैक्ट होता है, न्यूनतम वजन (10–15 ग्राम) देता है, इसमें कोई गतिशील भाग नहीं होता और लगभग 7 से 20 सेकंड का बहुत त्वरित कूल–डाउन समय प्रदान करता है।

एक जेटी क्रायो–कूलर मूल रूप से एक काउंटर फ्लो हीट एक्सचेंजर और एक नोजल है जो उच्च दबाव और तापमान से कम दबाव और तापमान तक एक रेफ्रिजरेंट (उच्च शुद्धता नाइट्रोजन या आर्गन) के आइसेंथाल्पिक विस्तार के जूल थॉमसन सिद्धांत के आधार पर प्रशीतन उत्पन्न करता है। क्रायो–कूलर को अक्सर एक विशेष तापमान पर वाट में मापी गई उनकी उपलब्ध प्रशीतन क्षमता के आधार पर मूल्यांकित किया जाता है, जिस पर प्रशीतन उपलब्ध होता है, उदाहरण के लिए 80K पर 1W। एक जेटी कूलर एक खुले चक्र पर काम करता है। एक अन्य महत्वपूर्ण पैरामीटर प्रशीतन प्राप्त करने के लिए आवश्यक पावर इनपुट या कार्य है। रेफ्रिजरेटर के प्रदर्शन के गुणांक को अनुपात के रूप में परिभाषित किया गया है:

सीओपी = प्रशीतन क्षमता / पावर इनपुट = उष्मा अवशोषण / किया गया कार्य

प्रदर्शन का आदर्श गुणांक कार्नोट मान है: सीओपी (कार्नोट) = $T_L / (T_H - T_L)$

जहां, T_L न्यूनतम चक्र तापमान (प्रशीतन तापमान) है और T_H अधिकतम चक्र तापमान है, आमतौर पर वायुमण्डलीय तापमान।

वास्तविक सीओपी और कार्नोट सीओपी के अनुपात को कूलर दक्षता कहा जाता है। वास्तव में, यह उस तरह का उपयोगी माप है, एक वास्तविक मशीन थर्मोडायनामिक आदर्श मशीन तक मापती है। इस प्रकार, कूलर दक्षता = वास्तविक सीओपी / कार्नोट सीओपी

नाइट्रोजन के साथ 300K पर इनलेट गैस से 78K पर तरल नाइट्रोजन का उत्पादन करने वाले कार्यशील तरल पदार्थ के साथ, यह देखा गया है कि 1W के प्रशीतन आउटपुट का उत्पादन करने के लिए 33.5W की इनपुट शक्ति की आवश्यकता होती है। इस प्रकार, यह JT कूलर का वास्तविक COP 1 / 33.5 = 0.03 देता है, जबकि आदर्श कार्नोट चक्र के लिए COP = $T_L / (T_H - T_L)$ = 78 / (300–78) = 78 / 222 = 0.35 होगा।

इस प्रकार, जेटी कूलर की दक्षता = (वास्तविक COP / कार्नोट COP) = 0.03 / 0.35 = 8.57 %

विकसित जेटी कूलर

अब तक एक सतत प्रवाह जेटी कूलर, जैसा कि चित्र 44 में दिखाया गया है, एसएसपीएल में विकसित किया गया है, जिसमें फिन–ट्यूब को छोड़कर सभी भाग स्वदेशी हैं। कमरे के तापमान पर शीतलन परीक्षण पर इस कूलर ने 3000psi (208 बार) दबाव के साथ आपूर्ति किए गए नाइट्रोजन गैस से 30 सेकंड के वांछित कूल–डाउन समय के भीतर तरल नाइट्रोजन का उत्पादन किया।

चित्र 44. निरंतर प्रवाह जेटी कूलर

हालाँकि, एक निरंतर प्रवाह जेटी कूलर वांछित शीत–तापमान प्राप्त करने पर क्रायोजेन के द्रव्यमान प्रवाह को नियंत्रित नहीं कर सकता, जिसके परिणामस्वरूप उच्च शुद्धता (6N शुद्ध) गैसों की भारी खपत होती है, जो एक मिसाइल वाहक पर सीमित मात्रा में उपलब्ध होती हैं। इस प्रकार वास्तविक स्थिति में स्व–विनियमन जेटी कूलर का उपयोग आवश्यक है। (चित्र 45)।

चित्र 45. स्व-विनियमन जेटी कूलर

स्व-विनियमित जेटी कूलर उपयोग करने का लाभ: एक स्व–विनियमित जेटी कूलर में, जैसे ही 80/90K का वांछित ठंडा तापमान प्राप्त हो जाता है, जेटी कूलर में निर्मित स्व–नियमन तंत्र क्रायोजेन के द्रव्यमान प्रवाह को उसके प्रारंभिक मूल्य से 5% से 10% तक कम कर देता है, इस प्रकार आपूर्ति की गई गैसों की काफी बचत होती है जिसके परिणामस्वरूप कूलरों का संचालन काफी लंबा हो जाता है।

एसएसपीएल में स्व–विनियमित जेटी कूलर विकसित करने का काम प्रगति पर है। इस जेटी कूलर के स्व–नियमन तंत्र को साकार करने के लिए सभी प्रयास किए जा रहे हैं। जेटी कूलर के स्व–विनियमन तंत्र का विखण्डित दृश्य चित्र 46 में दिखाया गया है और पूर्ण स्व–विनियमित जेटी कूलर का एक कटा हुआ खंड चित्र 47 में दिखाया गया है।

चित्र 46. जेटी कूलर के स्व-विनियमन तंत्र का विखण्डित दृश्य

चित्र 47. स्व-विनियमित जेटी कूलर का कटा हुआ खंड

अब तक धात्विक बैल्लो, जो इस तंत्र का हृदय है, साकार हो चुकी है। जेटी छिद्र पर सुई–वाल्व की सुई की गति को पूरी तरह से सीधा रखने के लिए एक मिनी फ्लेक्सचर स्प्रिंग भी डिजाइन किया गया और बाद में निर्मित किया गया।

अन्य लघु भागों को भी डिजाइन और निर्मित किया गया। इस प्रकार सभी आवश्यक हार्डवेयर को समझने के बाद, इस विनियमन तंत्र की कुछ असेंबलियों को एकीकृत करने का प्रयास किया गया है, लेकिन लगभग 27 बार के उच्च गैस दबाव के तहत इसके काम में पूर्णता अभी भी प्रगति पर है।

स्व-विनियमन जेटी कूलर का विकास

एसएसपीएल के पास एक प्राथमिक लघु जेटी क्रायो–कूलर विकसित करने का अनुभव है और उन्नत संस्करणों के विकास में शामिल तकनीकी जटिलताओं की सराहना करता है। देश में इन कूलरों के लिए उत्पादन सेटअप विकसित करने के लिए, प्रयोगशाला ने बेहतरीन मशीनिंग क्षमताओं/अनुभव वाले कुछ निजी उद्योगों को शामिल करने की संभावना का पता लगाया है और मुख्य रूप से यह सुनिश्चित किया है कि प्रासंगिक क्षमताएं/ज्ञान देश में उपलब्ध है।

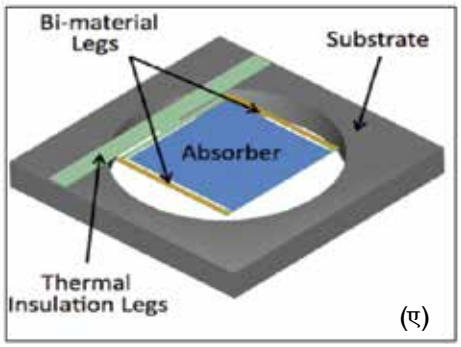
इसलिए टेक्नोलॉजी डेवलपमेंट फंड के तहत सेल्फ–रेगुलेटिंग जेटी कूलर का विकास चल रहा है।

उभरती प्रौद्योगिकियाँ

एमईएमएस-आधारित THz डिटेक्टर

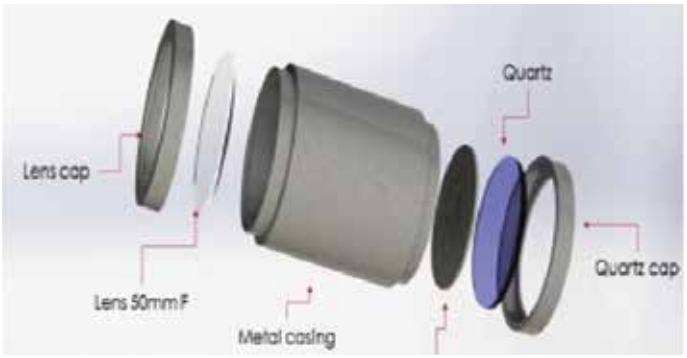
टेराहर्ट्ज (TH) तरंगें, 0.1 से 10 THz तक की आवृत्ति रेंज में विद्युत चुम्बकीय विकिरण को संदर्भित करती हैं। (1 THz = 10^{12} हर्ट्ज), जो 3 मिमी और 100 माइक्रोन के बीच तरंग दैर्ध्य के अनुरूप है। विस्फोटक, जैसे, एचएमएक्स, आरडीएक्स, पीईटीएन, आदि में THz आवृत्ति रेंज में अद्वितीय स्पेक्ट्रोस्कोपी विशेषताएं हैं। इसलिए सुरक्षा और आतंकवाद विरोधी समस्याओं को हल करने में उनके अनुप्रयोगों के लिए THz पर व्यापक रूप से शोध किया जा रहा है। THz गैर–आयनीकरण है फिर भी शरीर के ऊतकों के माध्यम से कुछ दूरी तक प्रवेश कर सकता है, इसलिए यह मेडिकल एक्स–रे के प्रतिस्थापन के रूप में रुचि रखता है। इसके अलावा, सबसे आम गैर–ध्रुवीय पदार्थ इसके लिए पारदर्शी होते हैं और THz आवृत्ति रेंज में वर्णक्रमीय फिंगरप्रिंट होते हैं जो गैर–विनाशकारी परीक्षण, चिकित्सा आदि सहित वैज्ञानिक और व्यावहारिक क्षेत्रों में अनुसंधान के लिए रुचि पैदा करते हैं THz संचार अनुसंधान का एक और महत्वपूर्ण क्षेत्र है क्योंकि यह माइक्रोवेव की तुलना में उच्च बैंडविड्थ और रिजॉल्यूशन प्रदान करता है। इस वर्णक्रमीय क्षेत्र में प्रौद्योगिकी अभी भी अपनी प्रारंभिक अवस्था में है और इसे आमतौर पर THz गैप के रूप में जाना जाता है।

एमईएमएस–आधारित THz डिटेक्टर में दो मुख्य क्षेत्र शामिल हैं (ए) द्वि–सामग्री तत्व (थर्मल विस्तार के विभिन्न गुणांक वाले सामग्रियों से युक्त सूक्ष्म–कैंटिलीवर या लैग्स) और (बी) मेटा–सामग्री अवशोषक, जैसा कि चित्र 48 में दिखाया गया है। मेटा–मटेरियल संरचना में तीन परतों का एक ढेर होता है, अर्थात, धातु, डाईईलेक्ट्रिक और एक निश्चित तरंग दैर्ध्य बैंड में अवशोषण को अधिकतम करने के लिए उपयुक्त आयाम और आकार के साथ निर्मित धातु। अवशोषित THz विकिरण पिक्सेल पर ऊष्मा में परिवर्तित हो जाता है। इससे जारी पिक्सेल के तापमान में वृद्धि होती है और दो सामग्रियों के थर्मल विस्तार के विभिन्न गुणांक के कारण द्वि–सामग्री सूक्ष्म–कैंटिलीवर में यांत्रिक विक्षेपण उत्पन्न होता है।

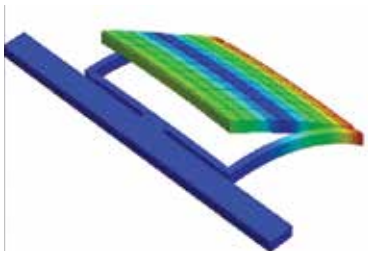


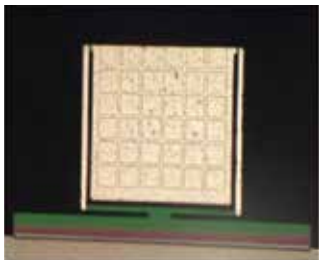
(ए)

डिजाइन किया गया एमईएमएस THz डिटेक्टर स्टार्क में सफलतापूर्वक निर्मित किया गया है और इसकी कार्यक्षमता को



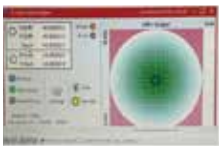
(बी)


(सी)


(डी)

(ई)

(एफ)


(जी)

चित्र 48. (ए) एवं (बी) Si सब्सट्रेट पर मेटा-मटेरियल अवशोषक के साथ THz द्वि-सामग्री सेंसर का 3D दृश्य (सी एवं डी) निर्मित THz डिटेक्टर और उसका पैकेज (ई) THz डिटेक्सन के लिए प्रायोगिक सेट अप (एफ एवं जी) THz अवशोषण से पहले और बाद में लेज़र बीम की स्थिति

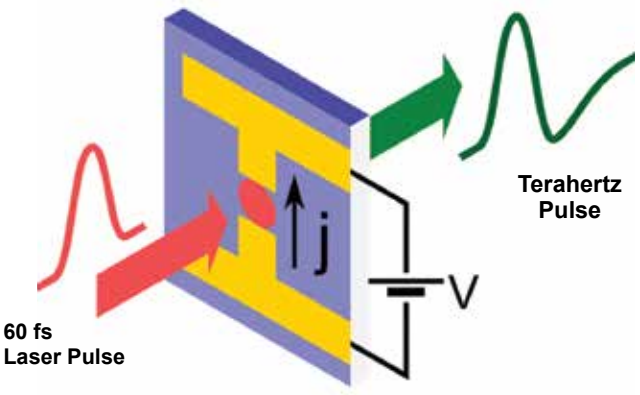
ऑप्टिकल रीडआउट का उपयोग करके प्रदर्शित किया गया है। एसएसपीएल एमईएमएस आधारित THz डिटेक्टर ऐरे के साथ–साथ THz बोलोमीटर तकनीक के डिजाइन पर भी काम कर रहा है।

फोटोकॉन्डक्टिव एंटीना (पीसीए)-आधारित THz प्रौद्योगिकी

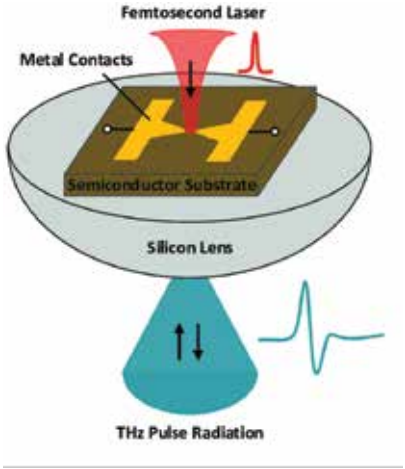
THz आवृत्ति के कार्य के रूप में THz विकिरण की सौम्य और खतरनाक सामग्रियों के साथ अलग–अलग बातचीत करने की क्षमता इसे स्पेक्ट्रोस्कोपी के आधार पर सुरक्षा जांच के लिए महत्वपूर्ण बनाती है। टेराहर्ट्ज विकिरण अधिकांश गैर–धात्विक और गैर–ध्रुवीय माध्यमों से आसानी से प्रसारित होता है, इस प्रकार THz सिस्टम को वहां मौजूद संभावित खतरनाक सामग्रियों की जांच करने के लिए

पैकेजिंग, नालीदार कार्डबोर्ड, कपड़े, जूते, बुकबैग इत्यादि जैसी छुपाने वाली बाधाओं को 'देखने' में सक्षम बनाता है। विस्फोटकों, रासायनिक और जैविक एजेंटों सहित सुरक्षा अनुप्रयोगों के लिए रुचि की कई सामग्रियों में विशिष्ट THz स्पेक्ट्रा होता है जिसका उपयोग फिंगरप्रिंट के लिए किया जा सकता है और इस प्रकार इन छिपी हुई सामग्रियों की पहचान की जा सकती है।

विभिन्न प्रकार के THz स्रोतों में से, फोटो कंडक्टिव एंटेना (पीसीए) के पास स्पेक्ट्रोस्कोपी और इमेजिंग एप्लिकेशन के लिए THz की पीढ़ी और पहचान के लिए अद्वितीय लाभ है; क्योंकि वे कॉम्पैक्ट एवं विश्वसनीय हैं और उन्हें वैक्यूम या क्रायोजेनिक कूलिंग की आवश्यकता नहीं होती है। पीसीए आधारित स्रोत कमरे के तापमान पर μWatt शक्ति और व्यापक बैंडविड्थ (~ 6THz) के साथ THz उत्सर्जन प्रदान करता है। पीसीए फोटोकंडक्टिविटी के सिद्धांत पर काम करते हैं, जो फाइबर ऑप्टिक लेजर के साथ कॉम्पैक्ट एकीकरण की अनुमति देता है और इसका उपयोग एक मजबूत THz स्पेक्ट्रोस्कोपी प्रणाली बनाने के लिए किया जा सकता है। पीसीए में एक डीसी पक्षपाती धातु द्विध्रुवीय एंटीना होता है जो अल्ट्राशॉर्ट वाहक जीवनकाल (<1ps) के साथ एक फोटोकॉन्डक्टिव सब्सट्रेट पर पैटर्नित होता है। फेमटोसेकंड ऑप्टिकल पल्स एंटीना गैप पर गिरता है, और अवशोषित होने पर फोटोकंडक्टर के अंदर फोटोकैरियर उत्पन्न करता है। उत्पन्न फोटोकैरियर को डीसी बायस क्षेत्र में त्वरित किया जाता है, जिससे एक क्षणिक फोटोकरंट उत्पन्न होता है, जो द्विध्रुवीय एंटीना को चलाता है और अंततः THz आवृत्ति पल्स के रूप में उत्सर्जित होता है। एफएस लेजर द्वारा पीसीए में THz पीढ़ी और एचआरएफजेड सी लेंस पर लगाए गए विशिष्ट पीसीए डिवाइस को चित्र 49 में दिखाया गया है।



चित्र 49. (ए) fs लेज़र द्वारा पीसीए में THz उत्सर्जन



चित्र 49. (बी) एचआरएफजेड लेंस पर स्थापित पीसीए डिवाइस

प्रयोगशाला आवश्यक (कम तापमान) LT-GaAs और LT-InGaAs सामग्री के विकास के साथ–साथ स्वदेशी फोटो कंडक्टिव एंटीना (PCA) आधारित THz स्रोत और डिटेक्टरों के विकास को लक्षित कर रही है। सामग्री और उपकरण विकास की तकनीक बहुत चुनौतीपूर्ण है और एसएसपीएल महत्वाकांक्षी रूप से ~60 μW THz स्रोत की डिलीवरी का लक्ष्य बना रहा है। प्रयोगशाला एक स्वदेशी THz टाइम डोमेन सिस्टम (THz-TDS) विकसित करने की भी योजना बना रही है और इसे कम दूरी (~1–फीट) अनुप्रयोगों के लिए पूरी तरह से स्वदेशी THz इमेजिंग और THz स्पेक्ट्रोस्कोपी प्रणाली का प्रदर्शन करने के लिए अनुकूलित किया जाएगा।

ग्राफीन THz प्रौद्योगिकी

ग्राफीन एक शून्य बैंड गैप सामग्री है, चालन बैंड और वैलेंस बैंड डायराक बिंदु पर एक दूसरे को छूते हैं और रैखिक ऊर्जा–संवेग फैलाव होता है जिसके परिणामस्वरूप विभिन्न दिलचस्प ऑप्टोइलेक्ट्रॉनिक गुण होते हैं। THz क्षेत्र में, ग्राफीन में मजबूत इंट्राबैंड अवशोषण गुण होते हैं और यह THz विकिरण का पता लगाने, उत्पादन और मॉड्यूलेशन के लिए एक आशाजनक सामग्री है।

एसएसपीएल ने ग्राफीन आधारित THz उपकरणों के निर्माण के लिए तकनीक विकसित की है। इस प्रौद्योगिकी विकास में ग्राफीन विकास, डिवाइस का सिमुलेशन और डिजाइनिंग, डिवाइस निर्माण और डिवाइस के परीक्षण को अनुकूलित किया गया है। ग्राफीन THz उपकरणों जैसे THz मॉड्यूलेटर और THz डिटेक्टर के निर्माण के लिए प्रक्रिया चरण स्थापित किए गए हैं।

ग्राफीन THz मॉड्यूलेटर

गेट वोल्टेज/ऑप्टिकल पल्स को लागू करके ग्राफीन में फर्मी स्तर को ट्यून किया जा सकता है और ग्राफीन चैनल में ट्रांसमिशन को THz फ्रीक्वेंसी रेंज में मॉड्यूलेट किया जा सकता है। एसएसपीएल ने ग्राफीन THz मॉड्यूलेटर के विभिन्न विन्यास तैयार किए, विद्युत गेटिंग द्वारा 15–23% तक और ऑप्टिकल पंपिंग द्वारा 45–55% तक मॉड्यूलेशन गहराई हासिल की।

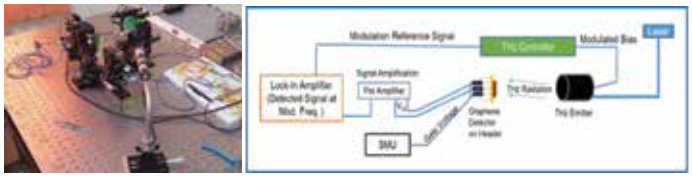
ग्राफीन THz डिटेक्टर

जब जीएफईटी चैनल में स्थिर धारा प्रवाहित होती है, तो चैनल में ग्राफीन प्लास्मोन उत्पन्न होते हैं जो गेट और स्रोत/नाली क्षमता को नियंत्रित करते हैं। ग्राफीन चैनल में विकसित क्षमता THz बीम की घटना की तीव्रता के सीधे आनुपातिक है। एस एसपीएल ने ग्राफीन THz डिटेक्टर तैयार किए हैं और 100 एमवी/डब्ल्यू और एनईपी 400 एनडब्ल्यू/हर्ट्ज 1/2 तक प्रतिक्रियाशीलता हासिल की है।

THz परीक्षण सुविधा

THz परीक्षण व्यवस्था सामग्री (ग्राफीन, MoS_2, InP, LT-GaAs, LT-InGaAs, आदि) के THz लक्षण वर्णन और THz फ्रीक्वेंसी डोमेन सिस्टम (THz-FDS सिस्टम) और THz टाइम डोमेन सिस्टम (THz-FDS) का उपयोग करके निर्मित THz उपकरणों के परीक्षण के लिए बनाई गई है। आपतित THz बीम की कम शक्ति के कारण THz बीम का पता लगाना एक चुनौती है। कमजोर THz बीम और लॉक–इन एम्पलीफायर, एसएमयू आदि को संरेखित करने के लिए विभिन्न ऑप्टो–मैकेनिकल घटकों का उपयोग करके, THz परीक्षण व्यवस्था को चित्र 50, 51 में सुधार किया गया है।

चित्र 50. विनिर्मित ग्राफीन THz मॉड्यूलेटर एवं ग्राफीन THz डिटेक्टर



चित्र 51. (ए) ऑप्टिकल पंपिंग द्वारा THz मॉड्यूलेटर का परीक्षण (बी) THz डिटेक्टर परीक्षण का योजनाबद्ध आरेख

क्वांटम टेक्नोलॉजीज

पिछले दो दशकों के भीतर, क्वांटम टेक्नोलॉजीज (क्यूटी) ने जबरदस्त प्रगति की है, क्वांटम भौतिकी में नोबल पुरस्कार विजेताओं ने प्रयोगों से आगे बढ़ते हुए व्यावहारिक अनुसंधान के एक क्रॉस–डिसिप्लिनरी क्षेत्र में प्रवेश किया है। इस क्षेत्र में अनिवार्य रूप से चार डोमेन शामिल हैं: क्वांटम कम्प्यूटेशन, जो कुछ गणनाओं को नाटकीय रूप से तेज करने के लिए क्वांटम प्रभावों को नियोजित करता है; क्वांटम संचार, जहां व्यक्तिगत या उलझे हुए फोटॉन का उपयोग सुरक्षित तरीके से डेटा संचारित करने के लिए किया जाता है; क्वांटम सिमुलेशन, जहां अच्छी तरह से नियंत्रित क्वांटम सिस्टम का उपयोग अन्य, कम सुलभ क्वांटम सिस्टम और क्वांटम सेंसिंग के व्यवहार को पुनः उत्पन्न करने के लिए किया जाता है, जहां बाहरी गड़बड़ी के लिए सुसंगत क्वांटम सिस्टम की उच्च संवेदनशीलता का उपयोग भौतिक मात्रा के माप के प्रदर्शन को बढ़ाने के लिए किया जाता है। क्वांटम भविष्य है और 21वीं सदी में विज्ञान, अर्थशास्त्र और समाज में नवाचारों का इंजन बनने वाली इन क्वांटम प्रौद्योगिकियों के रास्ते में कोई बाधा नहीं आनी चाहिए।

पिछले कुछ वर्षों में, क्वांटम कंप्यूटिंग के क्षेत्र में महत्वपूर्ण तकनीकी प्रगति दर्ज की गई है, जिसमें क्वांटम कंप्यूटरों ने सबसे अधिक सुर्खियाँ बटोरीं। हालाँकि, सेंसरों की दुनिया में तुलनात्मक रूप से कम दिखाई देने वाली और शांत क्रांति भी आने वाली है और उतनी ही उल्लेखनीय और महत्वपूर्ण है। क्वांटम सिस्टम बाहरी गड़बड़ी के प्रति अत्यधिक संवेदनशील हैं और हालांकि यह क्वांटम कंप्यूटिंग में एक चुनौती और प्रमुख कमजोरी साबित हो सकती है, यह 'क्वांटम सेंसर' विकसित करते समय एक लाभ के रूप में कार्य करता है। क्वांटम सेंसरों के एक उभरते वर्ग का उपयोग अब समय, आवृत्ति, विद्युत और चुंबकीय क्षेत्रों सहित कई भौतिक मात्राओं के मापन के लिए किया जा रहा है।

एसएसपीएल ने क्वांटम सेंसर पर काम शुरू कर दिया है और अल्ट्रा स्मॉल एटॉमिक क्लॉक (यूएसएसी) और लघु परमाणु मैग्नेटोमीटर के विकास के लिए व्यवहार्यता कार्य शुरू कर दिया है। इन दोनों परमाणु उपकरणों का पानी के भीतर संचार, जीपीएस से वंचित पर्यावरण, जीएनएसएस रिसीवर आदि के क्षेत्र में जबरदस्त रक्षा अनुप्रयोग है।

पिछले दशकों के दौरान चुंबकीय क्षेत्रों के वैज्ञानिक और तकनीकी उपयोग में कई सफलताएं हुई हैं, फिर भी कमरे के तापमान पर उच्चतम स्थानिक रिजॉल्यूशन वाले सबसे छोटे

चुंबकीय क्षेत्रों का पता लगाना एक बड़ी वैज्ञानिक चुनौती साबित हुई है। आने वाले वर्षों में उच्च स्थानिक रिजॉल्यूशन वाले हल्के, थर्मल रूप से स्थिर, व्यापक रेंज मैग्नेटोमीटर की आवश्यकता को क्वांटम मैग्नेटोमीटर से पूरा किया जा सकता है। इसमें कई सैन्य क्षेत्र शामिल हैं जहां सेंसर की आवश्यकता हो सकती है, उदाहरण के लिए, धातु की वस्तुओं जैसे कि गैर–विस्फोटित बारूद, भूभौतिकीय संरचनाओं, वाहनों और जहाजों द्वारा उत्पन्न चुंबकीय विसंगतियों का पता लगाने के लिए अत्यधिक सटीक स्थिति डेटा प्रदान करना।

इसलिए इन लघु मैग्नेटोमीटर के उपयोग से अगले कुछ वर्षों में सैन्य प्रौद्योगिकी परिदृश्य में एक नाटकीय बदलाव की कल्पना की जा सकती है। प्रस्तावित मैग्नेटोमीटर के लघुकरण और क्रियाशीलता को इससे लाभान्वित होने वाले प्रमुख अनुप्रयोगों पर महत्वपूर्ण प्रभाव डालना चाहिए और बाधित करना चाहिए।

परमाणु घड़ियाँ सबसे सटीक समय और आवृत्ति मानकों में से एक हैं जो अनुनादक के रूप में क्षार परमाणुओं के संक्रमण का उपयोग करती हैं। लगभग एक दशक से, इन परमाणु घड़ियों के लघु संस्करण को विकसित करने के लिए दुनिया भर में व्यापक काम किया गया है, जिन्हें आमतौर पर चिप स्केल परमाणु घड़ियों के रूप में जाना जाता है। इन लघु घड़ियों का सिद्धांत सुसंगत जनसंख्या ट्रैपिंग (सीपीटी) घटना पर आधारित है जो कुछ घन मिलीमीटर के एक कॉम्पैक्ट हर्मेटिकली सीलबंद सिलिकॉन वाष्प सेल में देखा जाता है जो इन क्वांटम स्रोतों का दिल है। क्षारीय वाष्प वाली इन कोशिकाओं से उच्च–आवृत्ति मॉड्यूलेटेड लेजर बीम द्वारा पूछताछ की जाती है और संकेतों का विश्लेषण किया जाता है।

ऐसी परमाणु घड़ियों की आवृत्ति स्थिरता सीजियम (Cs) या रुबिडियम (Rb) जैसे क्षार परमाणुओं के अति सूक्ष्म जमीनी स्तर के बीच संक्रमण पर आधारित होती है, जिनकी संक्रमण आवृत्तियाँ क्रमशः 9.91 GHz और 6.64 GHz होती हैं।

उन्नत अर्धचालक प्रसंस्करण, वीसीएसईएल और सीपीटी घटना जैसी चिप पर लेजर डायोड की उपलब्धता ने विशिष्ट अल्पकालिक स्थिरता <1E-11@1000 s और उम्र बढ़ने की दर <1E-8@ वर्ष के साथ पारंपरिक परमाणु घड़ी के लघुकरण को संभव बना दिया।

क्वांटम सेंसिंग

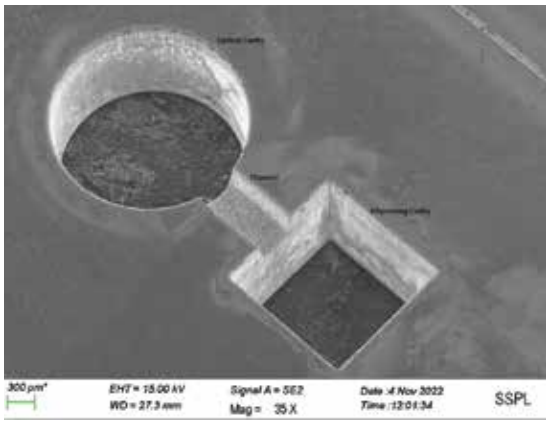
लघु परमाणु मैग्नेटोमीटर और लघु परमाणु घड़ी का विकास

एसएसपीएल कम शक्ति बजट के साथ अपने लघु संस्करण को प्रदर्शित करने के लिए क्वांटम सेंसर के भौतिकी पैकेज के प्रमुख घटकों अर्थात वीसीएसईएल और माइक्रोफैब्रिकेटेड अल्कलीवेपर सेल (एमएवीसी) के विकास पर काम कर रहा है। वाष्प सेल में आरबी या सीएस परमाणुओं के ध्रुवीकरण के लिए एक पंप स्रोत के रूप में वीसीएसईएल की आवश्यकता होती है। इसके लिए इन परमाणुओं की D1 या D2 संक्रमण आवृत्तियों पर तरंग दैर्ध्य का मिलान आवश्यक है। वीसीएसईएल का निर्माण जटिल तकनीक है और इसके लिए अत्याधुनिक बुनियादी ढांचे की आवश्यकता होती है। एसएसपीएल ने लघु मैग्नेटोमीटर के विकास पर प्रस्तावित परियोजना के तहत इन लेजर स्रोतों के विकास पर काम करना शुरू कर दिया है और यह परमाणु घड़ियों में भी उपयोग के लिए उपयुक्त होंगे। परमाणु सेंसर अनुप्रयोगों के लिए आवश्यक सख्त सहनशीलता के लिए वीसीएसईएल स्रोत की कठोर विशेषता की आवश्यकता होती है। एसएसपीएल में एक पूर्ण विशेषता सुविधा भी स्थापित की जा रही है। एक बार विकसित होने वाली तकनीक को भविष्य के उत्पादन के लिए गैटेक में अनुवादित किया जाएगा।

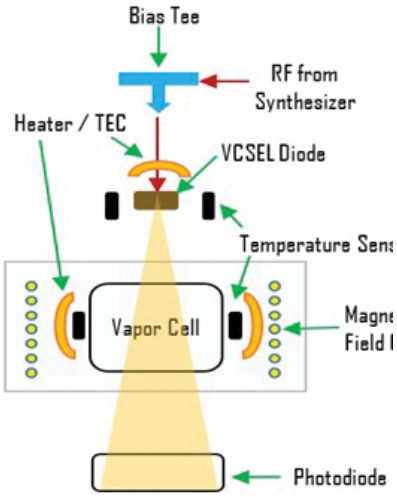
एमएवीसी सैंडविच प्रकार की संरचना होती है जिसमें सिलिकॉन से बनी गुहाएं दो ग्लास प्लेटों के बीच सैंडविच होती हैं। इष्टतम परमाणु घनत्व बनाए रखने के लिए इन उपकरणों को एक एकीकृत हीटर के साथ क्षार वाष्प और बफर गैस से लोड किया जाता है।

एसएसपीएल में, 1400 μm (1.4 मिमी) मोटा, 4" सिलिकॉन, पी टाइप <100> सब्सट्रेट जो 4" वेफर्स (500 μm) की पारंपरिक मोटाई नहीं है और वास्तव में 3X गुना अधिक का उपयोग किया गया है। दोहरी कैविटी डिजाइन जिसे डिस्पेंसिंग कैविटी और ऑप्टिकल कैविटी के रूप में जाना जाता है, 150μm गहरे चैनल के माध्यम से जुड़ा हुआ है, का उपयोग किया गया है। सैंडविच संरचना के निर्माण के लिए एनोडिक बॉन्डिंग के माध्यम से ग्लास/Si/ग्लास की हर्मेटिक सीलिंग का उपयोग किया गया है। ठोस अवस्था मार्ग के माध्यम से गहरी गुहाओं के अंदर अत्यधिक प्रतिक्रियाशील क्षार धातुओं का समावेश। सीएस और आरबी क्षार वाष्प कोशिकाओं का पहला प्रोटोटाइप जिसमें बफर गैस के रूप में आर्गन की उपस्थिति में विशिष्ट डाई आकार ≤ 10 मिमी X 8 मिमी और गुहा मात्रा ≤5 मिमी^{3} है, सफलतापूर्वक प्रदर्शित किया गया है। अगले तत्काल कदम के रूप में, उच्च शक्ति लेजर और फोकसिंग ऑप्टिक्स का उपयोग करके ठोस–अवस्था क्षार डिस्पेंसर गोलियों का सक्रियण किया जाएगा। गुहा के अंदर प्राप्त क्षार वाष्प का स्पेक्ट्रोस्कोपिक माप के माध्यम से विश्लेषण किया जाएगा जिसका सेटअप

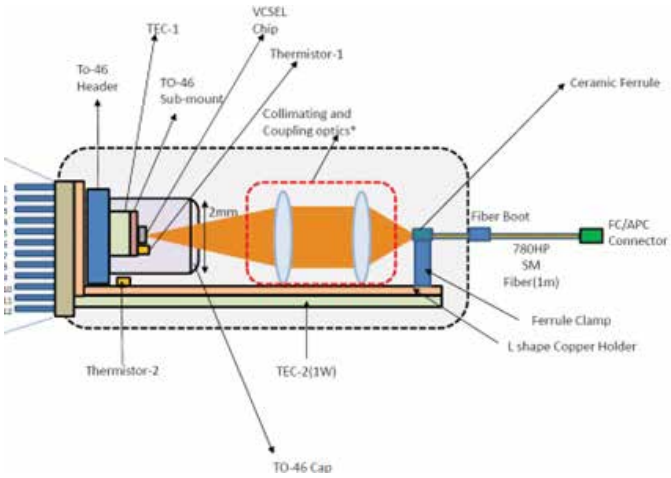
एसएसपीएल में तैयार हो रहा है। एसएसपीएल ज्यादातर स्वदेशी ऑप्टिकल/मैकेनिकल घटकों का उपयोग करके भौतिकी पैकेज विकास पर भी जोर देगा। स्वदेशी विकास को काफी हद तक समर्थन देने के लिए भारतीय उद्योग के माध्यम से लघु नियंत्रण इलेक्ट्रॉनिक्स और सॉफ्टवेयर विकास किया जाएगा। वर्तमान में, सिलिकॉन अल्कली वाष्प सेल का पहला प्रोटोटाइप प्रदर्शन एसएसपीएल में किया गया है। एक बार जब प्रणाली विकसित, तैयार और सफलतापूर्वक प्रदर्शित हो जाएगी, तो भारत इन–हाउस क्वांटम सेंसिंग तकनीक के लिए अग्रणी देशों में से एक होगा।



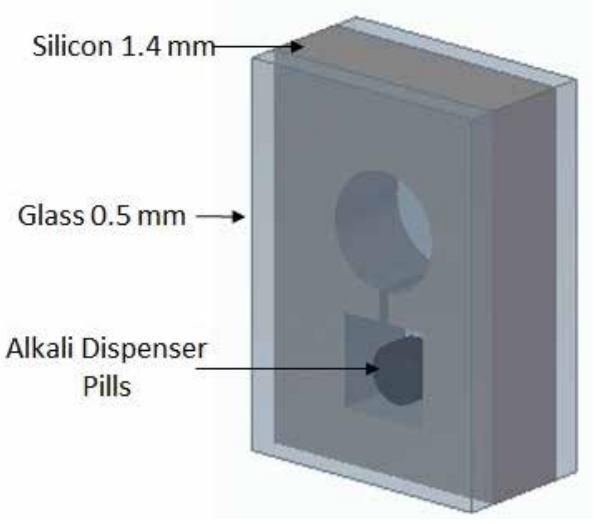
चित्र 54. लेजर मिलिंग द्वारा मिमी गहरी कैविटी



चित्र 52. भौतिकी पैकेज का योजनाबद्ध आरेख



चित्र 55. वीसीएसईएल मॉडयूल की लक्षित संरचना



चित्र 53. सिलिकॉन-आधारित क्षार सेल का योजनाबद्ध आरेख

चित्र 56. सिलिकॉन क्षार सेल मॉडयूल का पहला प्रोटोटाइप प्रदर्शन