प्रौद्योगिकी विशेष

डीआरडीओ का संस्थागत
एस एण्ड टी पत्रिका

खंड 11 अंक 2, मार्च–अप्रैल 2023 | डीआरडीओ की द्विमासिक पत्रिका | ISSN: 2319-5568

उन्नत अर्द्धचालक सामग्री प्रौद्योगिकियां

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।

मार्च–अप्रैल 2023
खंड 11, अंक 2

मुख्य संपादक: डॉ के नागेश्वर राव

मुख्य सह-संपादक: अलका बंसल

प्रबंध संपादक: अजय कुमार

संपादकीय सहायक: धर्म वीर

मुद्रण: एस के गुप्ता

वेफर एचईएमटी एपि.संरचना

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 सुसन टाइटस, एनएमआरएल
बेंगलूरू :	श्री सतपाल सिंह तोमर, एडीई श्रीमती एम आर भुवनेश्वरी, कैब्स श्रीमती ए जी जे फहीमा, केयर श्री आर कमलाकन्नण, सेमीलेक डॉ वी सेंथिल, जीटीआरई डॉ सुशांत क्षत्रे, एमटीआरडीसी
चंडीगढ़ :	डॉ पाल दिनेश कुमार, टीबीआरएल डॉ अनुजा कुमारी, डीजीआरई
चेन्नई :	श्रीमती एस जयसुधा, 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

माइक्रोइलेक्ट्रॉनिक प्रौद्योगिकी आधुनिक रक्षा प्रणालियों को आम नागरिकों के जीवन की सहजता के अनुरूप संबल प्रदान कर रही है। माइक्रोइलेक्ट्रॉनिक अनुप्रयोगों में आज हम जो उन्नयन व विकास देख रहे हैं, वे या तो सामग्री विकास में या उपकरण प्रक्रम प्रौद्योगिकियों में उद्भवों के परिणाम हैं। ठोसावस्था भौतिक प्रयोगशाला (एसएसपीएल), दिल्ली की उत्पत्ति लगभग छः दशक पहले डीआरडीओ के इलेक्ट्रॉनिक अनुसंधान खंड की अर्द्धचालक अथवा सेमीकंडक्टर शाखा से हुई थी, पर अब यह भारत में एक अद्वितीय प्रयोगशाला के रूप में तेजी से उभरकर आई है जिसने अर्द्धचालक सामग्री विकास से लेकर उपकरण के अभिकल्पन एवं फैब्रीकेशन, प्रौद्योगिकी का हस्तातंरण, और उत्पाद सुपुर्दगी तक के संपूर्ण स्पेक्ट्रम को कवर किया है।

एसएसपीएल के लिए यह एक सौभाग्य की बात है कि डेसीडॉक एसएसपीएल के मूलभूत सक्षमता वाले क्षेत्रो को टैक्नोलॉजी फोकस अथवा प्रौद्योगिकी विशेष के दो अंकों में संकलित करके प्रकाशित कर रहा है। प्रथम अंक आपके हाथ में है, जो सामग्री विकास एवं लक्षणवर्णन को कवर करता है तथा दूसरा अंक अर्द्धचालक उपकरणों, सेंसरों और एसएसपीएल द्वारा खोज किए जा रहे उभरते प्रौद्योगिकी क्षेत्रों को कवर करेगा।

प्रौद्योगिकी विशेष का यह अंक, नामतः 'उन्नत अर्द्धचालक सामग्री प्रौद्योगिकियां' गैलियम नाइट्राइड हेटरोस्ट्रक्चरों की नवोन्नत सामग्री विकास प्रौद्योगिकी को सम्मिलित करता है, जो रडारों के लिए ट्रांसरिसीव मॉड्यूलों में प्रयुक्त मोनोलिथिक सूक्ष्मतरंग एकीकृत परिपथ (मोनोलिथिक माइक्रोवेव इंटीग्रेटेड सर्किट्स) के लिए आवश्यक है। गैलियम नाइट्राइड हेटरोस्ट्रक्चरों को सिलिकॉन कार्बाइड सबस्ट्रेट (जिसे पूर्व में केवल आयात से प्राप्त किया जाता था) पर विकसित किया जाता है। अब, एसएसपीएल देशी सिलिकॉन सिंगल क्रिस्टल ग्रोथ टैक्नोलॉजी, जो टीओटी के लिए खुली है, को विकसित करके पूर्ण आत्मनिर्भरता के मार्ग पर है।

आईआर इमेजिंग के लिए अपेक्षित सामग्रियां अत्यधिक विशेषज्ञजन्य होती हैं, जो हमारे देश के लिए निषिद्ध हैं अर्थात उपलब्ध नहीं कराई जाती हैं। एसएसपीएल ने आईआर संवेदनशील सामग्रियों (जिन्हें उत्पादन में पहले ही प्रयोग किया जा रहा है) के विकास के लिए आत्मनिर्भरता हेतु अग्नि पुरस्कार प्राप्त किया है। आईआर डिटेक्टर प्रौद्योगिकी, जो कि एसएसपीलएल में विकास के अग्रिम चरण पर है, को हमारे देशी सामग्री पर विकसित किया जा रहा है। आईआर डिटेक्टरों के लिए टाइप II सुपरलैटिस सहित अति उन्नत सामग्री प्रौद्योगिकी भी एसएसपीएल में अग्रिम चरण पर है। एसएसपीएल टीएचज़ी उत्पादन एवं खोज के लिए भी सामग्रियां विकसित की हैं, जो ऐसी उच्च संवेदनशीलताएं प्रदर्शित करती हैं, जो आयात की गई सामग्रियां भी नहीं करती थीं।

यह अंक पहनने योग्य इलेक्ट्रॉनिक्स में एक संभावित भावी अनुप्रयोग के रूप में, ग्राफीन एवं मोलिब्डेनम डाइसल्फाइड (MoS_2) 2–विमीय फिल्मों के विकास में प्रयोगशाला द्वारा किए गए प्रयासों एवं उपलब्धियों को भी कवर करता है।

किसी भी सामग्री तंत्र व प्रणाली का विकास उसके गुणधर्मों के लक्षणवर्णन पर काफी ज्यादा निर्भर रहता है। एसएसपीएल के पास एक अत्याधुनिक सामग्री लक्षणवर्णन सुविधा केंद्र है, जो राष्ट्र में कहीं और नहीं है। यह

अंक एसएसपीएल में सामग्री के लक्षणवर्णन हेतु उपलब्ध सुविधाओं की विस्तृत गतिविधि को भी सम्मिलित करता है। इस सुविधा केंद्र का देश के अन्य आर एण्ड डी संस्थानों द्वारा भी उपयोग किया जा रहा है।

एसएसपीएल का आर एण्ड डी से आगे निकलकर उत्पादन क्षेत्र में उतरने का सपना साकार हो गया है, उसके फल उसे ऐसे उत्पादों की रेंज के रूप में प्राप्त हुए हैं जिन्हें पूर्ण रूप से स्वदेशी तरीके से विकसित किया जा रहा है। गैलियम नाइट्राइड एमएमआईसी हाइ पावर लेजर डायोड, आईआर खोज से संबद्ध महत्वपूर्ण उप प्रौद्योगिकियां तथा एमईएमएस के आधार पर सेंसर, एकाउस्टिक उत्सर्जन एवं एसएडब्ल्यू उपकरण एसएसपीएल में विकास के महत्वाकाँक्षी क्षेत्र हैं। इन प्रौद्योगिकी विकास से उभरकर आए उत्पादों में; पावर व ऊर्जा, एम्प्लीफायर, कम ध्वनि वाले एम्प्लीफायर, चिप रूप में एसपीडीटी स्विच, एसआईसी सिंगल क्रिस्टल वेफर, सिंगल एमिटर रेशा युक्त लेजर डायोड, स्ट्रिफिंग क्रायोकूफर, आईआर संवेदनशील सामग्रियां, एमईएमएस जी–स्विच, ई–नासिका सीडब्ल्यूए डिटेक्टर एवं विस्फोटक की खोज के लिए सीएनटी आधारित एन–नोस शामिल हैं। एसएसपीएल द्वारा विकसित कई प्रौद्योगिकियों एवं उत्पादों को डीआरडीओ प्रयोगशालाओं द्वारा स्वीकार किया जा रहा है तथा अंतरिक्ष अनुप्रयोगों के लिए उपयोग भी किया जा रहा है।

मुझे विश्वास है कि 'उन्नत अर्द्धचालक सामग्री प्रौद्योगिकियां' पर इस अंक की संकलन सामग्री विकास एवं उसके लक्षणवर्णन के क्षेत्र में प्रयोगशाला की उपलब्धियों की तस्वीर सभी पाठकों तक स्पष्ट रूप में पहुंच रही है।

डॉ सीमा विनायक
उत्कृष्ट वैज्ञानिक एवं निदेशक, एसएसपीएल

उन्नत अर्द्धचालक सामग्री प्रौद्योगिकियां

ठोसावस्था भौतिक प्रयोगशाला (एसएसपीएल), दिल्ली रक्षा अनुप्रयोगों के लिए कुछ सामरिक रूप से महत्वपूर्ण सामग्री के बल्क एवं एपीटैक्सीय सामग्रियों के विकास का कार्य निष्पादित कर रहा है। गत वर्षों के दौरान आर एण्ड डी प्रयासों के फलस्वरूप, इस क्षेत्र में प्रयोगशाला में व्यापक अनुभव एवं ज्ञान आधार का सृजन हुआ है।

आधुनिक उपकरणों व यंत्रों के लिए अत्याधुनिक, जटिल हेटरो एपि–संरचनाओं की आवश्यकता होती है, जो विविध संघटनों के साथ पतली परतों के ढेरों, कुछ एकाकी परतों से लेकर माइक्रॉन्स तक की परिवर्ती मोटाई, अणु की दृष्टि से असंगत इंटरफेसों के साथ नियंत्रित डोपिंग प्रोफाइलों से निर्मित होती हैं। इस प्रकार की एपि–संरचनाओं के स्वदेशी विकास के लिए प्रयास किए गए ताकि डीआरडीओ की विभिन्न परियोजनाओं हेतु अपेक्षित विभिन्न सूक्ष्म इलेक्ट्रॉनिक उपकरण विकसित किए जा सकें। इस प्रकार की गंभीर आवश्यकता के साथ, सामग्री एपि–संरचनाओं को केवल एपीटैक्सीय ग्रोथ तकनीकों, जैसे कि मॉलीक्यूलर बीम एपीटैक्सी (एमबीई), धात्विक जैविक रासायनिक वाष्प जमाव (एमओसीवीडी) अर्थात आदि के द्वारा ही प्राप्त किया जा सकता है।

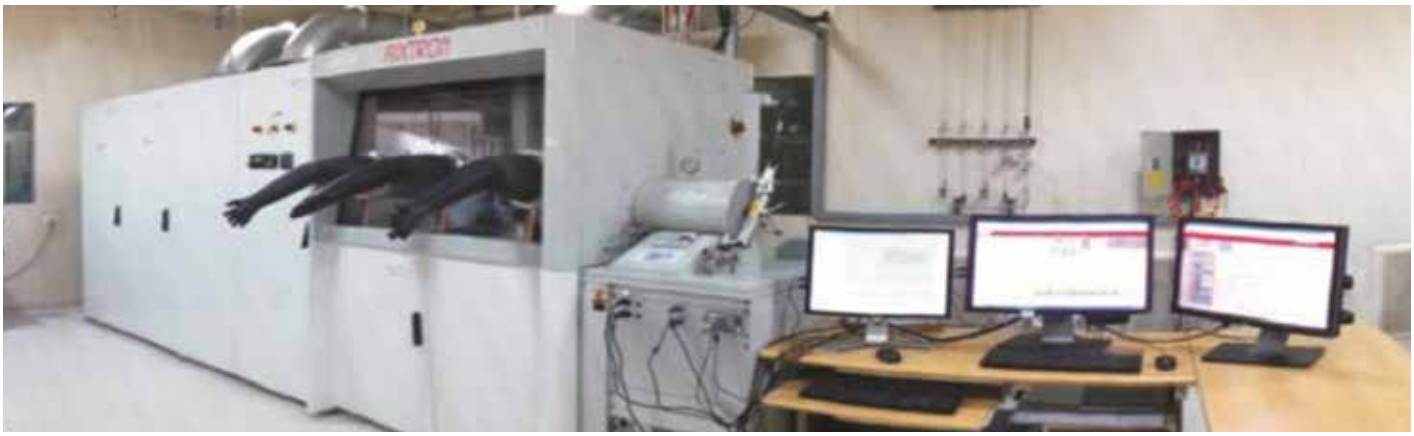
विभिन्न उन्नत III-V एवं II-VI अर्द्धचालक सामग्रियों के बल्क एवं एपीटैक्सीय संवृद्धि व विकास के लिए नवोन्नत सुविधाएं स्थापित की गईं। एसएसपीएल ने II-VI सामग्री के लिए प्रौद्योगिकी स्वदेशी रूप से विकसित की है, जो सामरिक प्रकृति की है। देश में इनका उत्पादन आत्मनिर्भरता प्राप्त करने हेतु टीओटी के माध्यम से किया जा रहा है। प्रयोगशालाओं में विकसित डिवाइस क्वालिटी हेटरोस्ट्रक्चर्स एपि–सामग्री को विभिन्न उपकरणों, जैसे कि आईआरएफपीए, गैलियम आर्सेनाइड एवं गैलियम नाइट्राइड–आधारित एचईएमटी/एमएमआईसी, उच्च ऊर्जा के लेजर डायोड, सोलर सेल्स आदि के विकास के लिए उपयोग किया गया है।

गत वर्षों के दौरान एपि–सामग्री एवं बल्क क्रिस्टल ग्रोथ प्रौद्योगिकियों में प्राप्त महत्वपूर्ण उपलब्धियों का वर्णन नीचे किया जा रहा है:

एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड/ गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी एपीटैक्सीय ग्रोथ प्रौद्योगिकी

गैलियम नाइट्राइड–आधारित उच्च इलेक्ट्रॉनिक मोबिलिटी ट्रांजिस्टर (एचईएमटी) हेटरो संरचनाओं की आवश्यकता उच्च निष्पादनीय एचईएमटी उपकरणों/एमएमआईसी के निर्माण व नवीनीकरण के लिए होती है। एक गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी लाक्षणिक हेटरो संरचना में, उसके संघटन तथा नैनोमीटर स्तर के अनुसार मोटाई पर सख्त नियंत्रण के साथ विभिन्न एपीटैक्सीय परतें सन्निहित होती हैं।

उप–नैनोमीटर स्तर पर विभिन्न इंटरफेसों की वांछित निरंतरता/असंगतता को वृद्धि प्रक्रिया पर अणु पैमाने के नियंत्रण की आवश्यकता होती है। एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड/गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी इपिवेफर वृद्धि प्रक्रिया विकसित करने के लिए धात्विक जैविक रासायनिक वाष्प जमाव (एमओसीवीडी) का प्रयोग किया गया, क्योंकि यह बड़े पैमाने पर उत्पादन करने में समर्थ है तथा इसकी विनिर्माण लागत भी कम है। एसएसपीएल में स्थापित एमओसीवीडी सुविधा केंद्र 3 x 2", 1 x 3" तथा 1 x 4" की वृद्धि सक्षमता के साथ एक बंद–युग्मित शोवरहेड (सीसीएस) रिएक्टर का प्रयोग करता है (चित्र 1)। स्व–स्थाने उपकरण तत्क्षण वृद्धि प्रक्रिया की निगरानी करने तथा संपूर्ण ससेप्टर तापमान की मैपिंग करने में सहायता प्रदान करते हैं।



चित्र १. III-नाइट्राइड एमओसीवीडी प्रणाली

गैलियम नाइट्राइड सामग्री की संवृद्धि करना काफी चुनौतीपूर्ण है, जिसका मुख्य कारण घरेलू गैलियम नाइट्राइड आधार स्तर का अभाव है। वांछित एपीटैक्सीय हेटरो संरचनाओं के विकास के लिए अनेक प्रकार के क्रिस्टलीय आधार स्तर विकल्पों, नामतः सैफायर, सिलीकॉन कार्बाइड एवं सिलीकॉन का प्रयोग किया जाता है। तथापि, रक्षा अनुप्रयोगों के लिए प्रौद्योगिकी के विकास हेतु सिलीकॉन कार्बाइड का प्रयोग किया जाता है, क्योंकि लैटिस स्थिरांक एवं गैलियम नाइट्राइड के साथ तापीय विस्तार गुणांक में यह न्यूनतम असंगतता प्रदर्शित करता है। इसके अतिरिक्त, सिलीकॉन कार्बाइड की उच्च तापीय चालकता इसे उच्च ऊर्जा के आरएफ अनुप्रयोगों के लिए काफी उपयुक्त बना देती है।

गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी सामग्री प्रौद्योगिकी विकसित करने में मुख्य चुनौती यह है कि इसे विकसित करने में वांछित दो विमीय इलेक्ट्रॉन घनत्व एवं गतिशीलता प्राप्त करने के साथ–साथ अपचयित विस्थापन घनत्व तथा डीप इलेक्ट्रॉन जाल के रूप में कार्य कर रही अशुद्धताओं पर नियंत्रण की आवश्यकता होती है।

सतत आर एण्ड डी प्रयासों के फलस्वरूप, एक उत्पादन संगत गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी वृद्धि प्रौद्योगिकी सैफायर एवं सिलीकॉन कार्बाइड आधार स्तर पर विकसित की गई। इस विकसित गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी एपि–वेफर्स (चित्र 2) ने ऐसे अभिलक्षण (तालिका 1) प्रदर्शित किए, जो नवोन्नत गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी सामग्री प्रौद्योगिकी से तुलनीय थे।

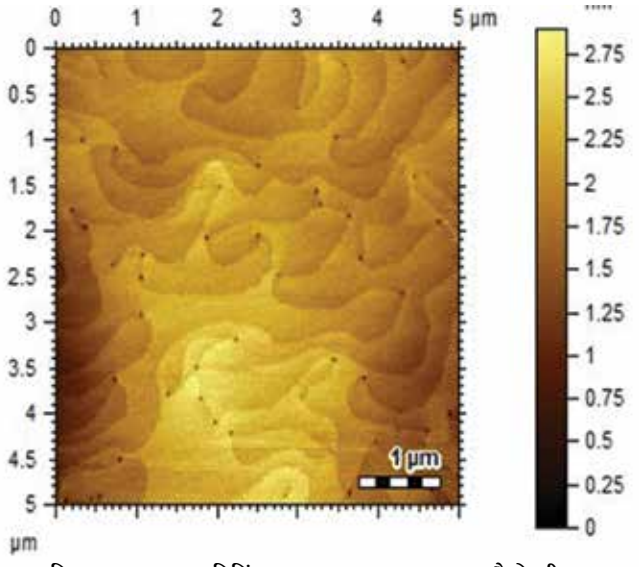
चित्र २. सैफायर एवं सिलीकॉन कार्बाइड पर विकसित एचईएमटी एपि-वेफर्स

तालिका 1 : एचईएमटी एपि-वेफर्स के अभिलक्षण

सिलीकॉन कार्बाइड अधः स्तर पर एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड / गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी विनिर्देश	
गतिशीलता (cm^2/Vs)	~ 2000
शीट सांद्रता (cm^{-2})	~ 1E13
R_s समरूपता, (मानक विचलन)	~5%
मोटाई समरूपता, (मानक विचलन)	~1%
एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड, एल्युमिनियम तत्व समरूपता	~1%

लगभग 0.34 नैनोमीटर की एएफएम आरएमएस रुक्षता (5μmx5μm) के साथ एपि–संरचनाएं निरंतरता के साथ प्राप्त की गईं जिनकी चरण प्रवाह वृद्धि आकारिकी (चित्र 3) और मोटाई समरूपता 1% से कम के मानक विचलन के अनुरूप थी। इन एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी एपि–वेफर्स को एचईएमटी उपकरण फैब्रीकेशन प्रौद्योगिकी के सफलतम विकास के लिए उपयोग किया गया है।

मानक एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड–आधारित एचईएमटी संरचनाओं के अलावा, इण्डियम एल्युमिनियम नाइट्राइड–आधारित लैटिस संगत एचईएमटी संरचनाओं को भी संवृद्ध किया गया और उच्च आवृति उपकरणों के लिए इष्टतमीकृत किया गया।



चित्र ३. एएफएम प्रतिबिंग: आरएमएस रुक्षता ०.३४ नैनो मी.

आईआरएफपीए प्रौद्योगिकियों के लिए सामग्रियां

आईआरएफपीए प्रौद्योगिकियों के लिए आवश्यक सामरिक सामग्री विकास हेतु, अर्द्धचालक सामग्रियों, जैसे कैडमियम जिंक टेलुराइड (सीजेडटी, जिंक = ~ 4%), HgCdTe या मरकरी कैडमियम टेलुराइड (एमसीटी) एवं जर्मेनियम (Ge, Sb मिलाकर) की एपीटैक्सीय परतों को विकसित करके प्रयोगशाला में अपेक्षित आकार एवं गुणवत्ता के साथ फैब्रीकेट किया गया। गत वर्षों के दौरान इन क्षेत्रों में कई प्रौद्योगिकीय उपलब्धियों, महत्वपूर्ण खोज और उत्पाद विकसित किए गए हैं।

सीजेडटी अधः स्तरों का उपयोग आईआरएफपीए विकास के लिए एमसीटी एपीटैक्सीय परतों की घरेलु वृद्धि के लिए किया जाता है, जो कि प्रयोगशाला का एक प्रमुख प्राथमिकता वाला क्षेत्र है। सामरिक महत्ता के कारण, उपकरण गुणवत्ता एमसीटी एपिलेयर्स एवं आईआरएफपीए ग्रेड के सीजेडटी अधःस्तर भारत के लिए उपलब्ध नहीं हैं। विश्वभर में एमसीटी–आधारित प्रौद्योगिकियों

में प्रमुख संगठन केवल घरेलु निर्मित की गई सामग्री पर ही विश्वास करते हैं। सीजेडटी एवं एमसीटी और आईआरएफपीए सामग्रियों में आत्मनिर्भरता प्राप्त कर ली गई है, जो प्रयोगशाला के आईआर उपकरण विकास के लिए आवश्यक सामग्रियां हैं। भारत में सीजेडटी अधः स्तर को एसएसपीएल द्वारा विकसित प्रौद्योगिकी का प्रयोग करके उद्योग भागीदार के साथ नियमित रूप से उत्पादित किया जाता है, और एमसीटी एपीटैक्सीय परतों को इन आपूर्ति किए गए अवस्तरों में संवृदध किया जाता है, जिन्हें तत्पश्चात उपकरण के फैब्रीकेशन के लिए उपयोग किया जाता है।

प्रयोगशाला ने सीजेडटी क्रिस्टल वृद्धि के लिए तथा अवस्तरों के फैब्रीकेशन के लिए एक उत्पादन संगत प्रौद्योगिकी स्वदेशी रूप से विकसित की है और उनके नियमित उत्पादन के लिए देश में एक उत्पादन सुविधा केंद्र स्थापित किया है। आधाररेखा प्रौद्योगिकी को सामग्री की गुणवत्ता, उत्पादकता और अवस्तर आकार को बढ़ाने के लिए एसएसपीएल के निरंतर आर एण्ड डी प्रयासों द्वारा नियमित रूप से अद्यतित किया गया है। यह प्रौद्योगिकी इतनी परिपक्व हो गई है कि यह अंतर्राष्ट्रीय मानकों के सीजेडटी अवस्तरों को बड़े पैमाने के क्षेत्र (30 मिमी x 40 मिमी) में उत्पादित करने में सक्षम है।

एमसीटी प्रौद्योगिकी को स्वदेशी रूप से विकसित किया गया है और देश में उत्पादित सीजेडटी अवस्तरों पर स्थापित किया गया है। प्रौद्योगिकी पर डिटेक्टर ऐरे को फैब्रीकेट करके उसे प्रदर्शित किया गया है। मध्य तरंग अवरक्त (एमडब्ल्यूआईआर) अनुप्रयोगों के लिए एमसीटी एपीटैक्सीय परतों को तरल प्रावस्था एपीटैक्सी (एलपीई) तकनीक का प्रयोग करके प्रयोगशाला में संवृदध और लक्षणवर्णित किया जाता है। उपकरण की गुणवत्ता के साथ पूर्ण रूप से लक्षणवर्णित एपिलेयर्स की आपूर्ति नियमित रूप से की जाती है और प्रयोगशाला में डिटेक्टर ऐरे फैब्रीकेशन के लिए उपयोग किया जाता है। इस सामग्री पर आईआर थर्मल इमेज प्राप्त की गई, और तदुपरांत एसएसपीएल की आईआर सामग्री प्रौद्योगिकी प्रदर्शित की गई।

एसएसपीएल का आईआर कार्यक्रम उन सीजेडटी अवस्तरों पर पूर्ण रूप से निर्भर रहता है, जिन्हें भारत में विकसित उत्पादन सुविधा केंद्र में उत्पादित किया जाता है और उन पर घरेलु एमसीटी एपिलेयरों को संवृदध किया जाता है।

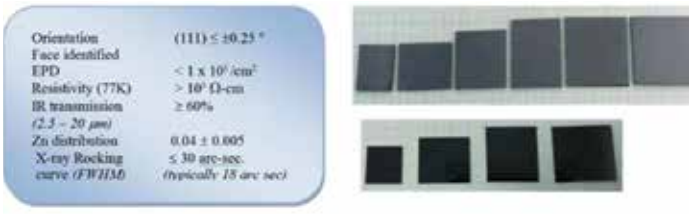
कैडमियम जिंक टेलुराइड (सीजेडटी) बल्क क्रिस्टल की संवृद्धि

आईआरएफपीए ग्रेड के कैडमियम जिंक टेलुराइड (सीजेडटी) अवस्तर के प्रौद्योगिकीय विकास के मुख्य मुद्दों में उसका आकार, क्रिस्टलीयता और आर्थिक पहलु हैं जो सामग्री के अंतर्निहित गुणधर्मों से संबद्ध हैं। विस्तृत आर एण्ड डी प्रयासों और संशोधनों के साथ, प्रौद्योगिकी में उन्नयन क्रिस्टल के व्यास एवं अवस्तर के आकार के आधार पर तथा बढ़ती क्रिस्टलीयता गुणवत्ता के साथ किए गए तथा उन्हें उत्पादन लाइन में शामिल किया गया, जैसा कि (चित्र 4) में दर्शाया गया है।

अंतर्राष्ट्रीय मानकों की पूर्ति करने वाले सीजेडटी अवस्तरों को देश में एसएसपीएल द्वारा विकसित प्रौद्योगिकी का प्रयोग करके नियमित रूप से उत्पादित किया जाता है (चित्र 5) और प्रयोगशाला में आईआरएफपीए के विकास के लिए सामान्य रूप से प्रयोग किया जाता है। इन सीजेडटी अवस्तरों को प्रयोगशाला के आईआरएफपीए कार्यक्रम के लिए एमसीटी एपीटैक्सीय वृद्धि के लिए घरेलु उपयोग किया जाता है, जिससे राष्ट्र इस सामरिक रक्षा क्षेत्र में आत्मनिर्भर बन चुका है।

(अ) (ब)

चित्र ४. प्रौद्योगिकीय उन्नयन, (अ) क्रिस्टल व्यास को बढ़ाकर ७० मिमी किया गया, और (ब) बढ़ाया गया जल आकार

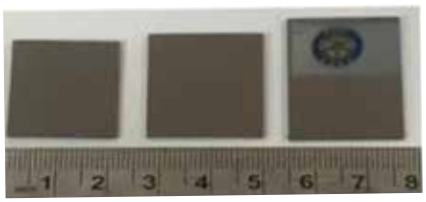


(अ) (ब)

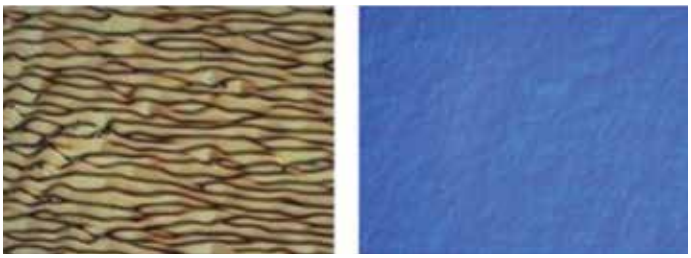
चित्र ५. देश में उत्पादित अवस्तर (अ) विशिष्टताएँ, और (ब) सीजेडटी अवस्तर < ३० मिमी x ४० मिमी

एलपीई द्वारा मरकरी कैडमियम टेलुराइड (एमसीटी) एपीटैक्सीय परत

एमसीटी–आधारित आईआरएफपीए के विकास के लिए, उपकरण गुणवत्ता के $Hg_{1-x} Cd_x Te$ परतों को (111) बी ओरिएंटेड लैटिस संगत सीजेडटी अवस्तरों पर तरल प्रावस्था एपीटैक्सी (एलपीई) तकनीक द्वारा संवृदध किया जा रहा है। एमडब्ल्यूआईआर एवं एलडब्ल्यूआईआर वैवबैंड अनुप्रयोगों के लिए एमसीटी एपिलेयरों के विकास के लिए एलपीई वृद्धि रिएक्टर, एपिलेयरों की पॉलिशिंग (चित्र 6) और लक्षणवर्णन सहित एक पूर्ण सुविधा केंद्र प्रयोगशाला में स्थापित किया गया है।



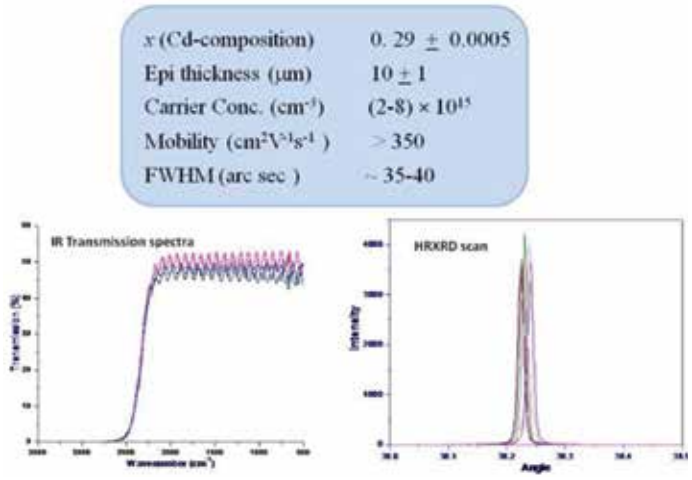
चित्र ६. (अ) सीजेडटी अवस्तरों में संवृदध एमसीटी एपिलेयर



चित्र ६. (ब) एएस-संवर्धित एपिलेयर एवं पॉलिश्ड उपकरण एपिलेयर पृष्ठ का सूक्ष्मदर्शी पृष्ठ (१३५० मिमी x १०१० मिमी)

उपकरण गुणवत्ता आईआरएफपीए एपिलेयर वृद्धि प्रौद्योगिकी को एसएसपीएल के स्वदेशी सीजेडटी प्रौद्योगिकी का प्रयोग करके देश में उत्पादित सीजेडटी अवस्तरों पर स्थापित किया गया है। आज के समय में, डिवाइस उपकरण गुणवत्ता (चित्र 7) के घरेलु विकसित एमसीटी एपिलेयरों को प्रयोगशाला में नियमित रूप से संवृदध किया जाता है तथा आईआरएफपीए के विकास कार्यक्रम के लिए उपयोग किया जाता है।

इससे आईआरएफपीए प्रौद्योगिकी के लिए प्रयोगशाला के सामग्री विकास कार्यक्रम का पूर्ण रूप से स्वदेशीकरण हो गया है।

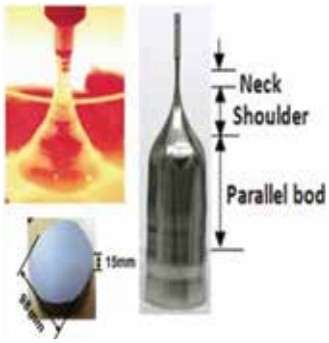


चित्र ७. प्रयोगशाला में संवृद्ध उपकरण गुणवत्ता एमसीटी एपिलेयर

एंटिमॉनी डोप्ड जर्मेनियम एकल क्रिस्टल

एंटिमॉनी डोप्ड जर्मेनियम को, उसकी अवरक्त क्षेत्र (2–15μm) में उच्च प्रेषण और अपवर्तक सूचकांक के कारण आईआरएफपीए के लिए लेंस एवं विंडो निर्मित करने हेतु बड़े पैमाने पर प्रयोग किया जा रहा है। एसएसपीएल ने जॉकरालस्की (सीजेड) तकनीक (जर्मेनियम पुलर 20–04) से ऑप्टिकल ग्रेड 4'' व्यास, <111> ओरिएंटेड जर्मेनियम एकल क्रिस्टल (एंटिमॉनी डोप्ड) की संवृद्धि के लिए और इसके ब्लैंक्स के फैब्रीकेशन के लिए प्रौद्योगिकी विकसित की है (चित्र 8 एवं चित्र 9)।

चित्र ८. सीजेड जर्मेनियम पुलर



चित्र ९. ४'' व्यास का जर्मेनियम क्रिस्टल एवं जर्मेनियम ब्लैंक्स

प्रयोक्ता की आवश्यकताओं के अनुसार, संवृद्धि प्रणाली एवं पैरामीटरों में सुधार किए गए ताकि ऑप्टिकल 2'' एवं 3'' व्यास के जर्मेनियम क्रिस्टल संवृद्ध किए जाएं।

अपेक्षित गुणवत्ता एवं व्यास के जर्मेनियम ब्लैंक्स की आपूर्ति स्वदेशी उत्पाद विकास के लिए विभिन्न प्रयोक्ताओं (आईआरडीई–देहरादून, बीईएल–मछलीपत्तनम एवं एसएसी–इसरो अहमदाबाद) को की गई। एसएसपीएल द्वारा आपूर्ति किए गए जर्मेनियम ब्लैंक्स पर फैब्रीकेट किए गए जर्मेनियम लेंसों को प्रयोक्ताओं द्वारा तथा थर्मल इमेजर के साथ एकीकरण के उपरांत अंतर्राष्ट्रीय मानकों के अनुसार ऑप्टिकल ग्रेड (चित्र 10) का पाया गया। प्रयोक्ता के सफल परीक्षण के पश्चात, जर्मेनियम प्रौद्योगिकी अब देश में जर्मेनियम ब्लैंक्स के उत्पादन के लिए हस्तांतरण हेतु तैयार है।

Crystalline Form	Monocrystalline (111)
Conductivity Type	n-type (Sb doped)
Resistivity	5-30 ohm-cm
% Transmission	≥ 45% (2-14μm)

चित्र १०. जर्मेनियम ब्लैंक अभिलक्षण एवं फैब्रीकेट किए गए जर्मेनियम लैंस

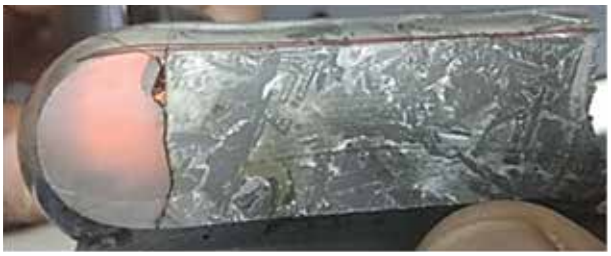
THz अनुप्रयोगों के लिए जिंक टेल्युराईड क्रिस्टल संवृद्धि

उच्च गुणवत्ता के जिंक टेल्युराईड क्रिस्टल, THz उत्पादन एवं अन्वेषण आधारित अनुप्रयोगों के लिए एक वैकल्पिक सामग्री है। जिंक टेल्युराईड क्रिस्टल की संवृद्धि एसएसपीएल के हाल ही की उपलब्धियों में से एक है, जिसमें जिंक टेल्युराईड क्रिस्टल को (110) ओरिएंटेशन में संवृदध किया गया जिसके लिए तापमान प्रवणता विलयन विधि (टीजीएसएम) और जिंक टेल्युराईड अवस्तरों का प्रयोग किया गया तथा अपेक्षित परिमापों व विमाओं को क्रिस्टल के ओरिएंटेशन की कटिंग करके, अवस्तरों को कट वेफर्स से चौकोर टूकड़ों में काटकर तथा उनकी लैपिंग/पॉलिशिंग के द्वारा फैब्रीकेट किया गया (चित्र 11)।

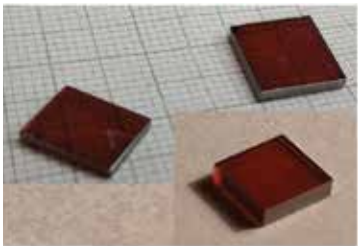
एक्सरे विवर्तन स्पेक्ट्रा एवं फोटोलुमिनेसेंस स्पेक्ट्रा में प्रेक्षित खराब लुमिनेसेंस बैंड के विरूद्ध क्रमशः शुद्ध जिंक टेल्युराईड प्रावस्था एवं प्रबल बैंड एज ने संवृद्ध जिंक टेल्युराईड क्रिस्टल में अच्छी गुणवत्ता तथा न्यून त्रुटि इंगित की (चित्र 12)। इस परिणाम का पुष्टिकरण सामग्री की उच्च प्रतिरोधकता (>1ई7 ohm–सेमी) द्वारा तथा अवरक्त पारेषण (तरंग प्रसार संख्या 500–600 सेमी$^{-1}$ में 50–55%) से हुई।

THz अनुप्रयोगों के लिए फैब्रीकेट किए गए (110) जिंक टेल्युराईड अवस्तरों का मूल्यांकन टाटा इंस्टीट्यूट ऑफ फंडामेंटल रिसर्च (टीआईएफआर), मुंबई (प्रयोक्ता) द्वारा किया गया। एसएसपीएल द्वारा विकसित जिंक टेल्युराईड अवस्तरों ने वाणिज्यिक जिंक टेल्युराईड अवस्तरों की तुलना में उच्च THz पारेषण एवं THz खोज प्रदर्शित की (चित्र 13)। टीआईएफआर ने इन अवस्तरों को उच्च गुणवत्ता के लिए और THz-आधारित अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त पाया।

संवृद्ध जिंक टेल्युराईड क्रिस्टल (व्यास ३० मिमी)

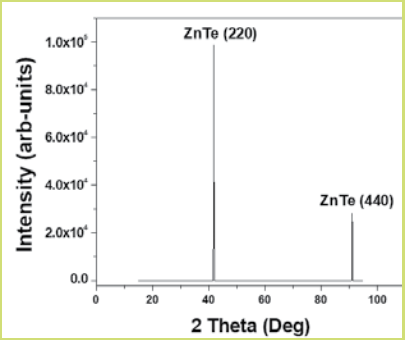


जिंक टेल्युराईड + टेल्युराईड

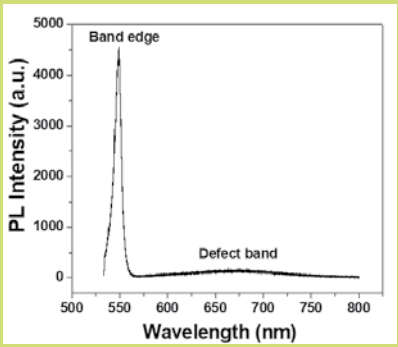


फैब्रीकेट किए गए (११०) जिंक टेल्युराईड अवस्तर, आकार: १० मिमी x १० मिमी x (२ मिमी तक)

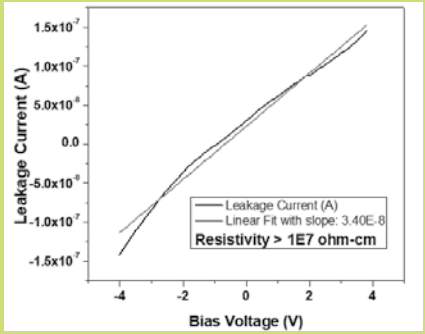
चित्र ११. क्रिस्टल संवृद्ध जिंक टेल्युराईड एवं अवस्तर



एक्सरे विवर्तन स्पेक्ट्रा

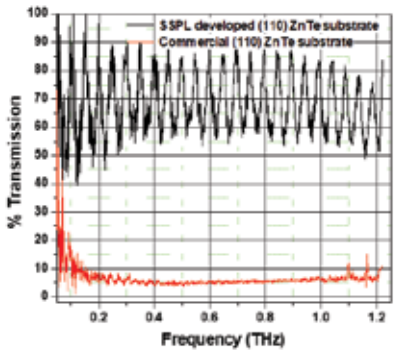


कक्ष तापमान पर फोटोलुमिनेसेंस स्पेक्ट्रा

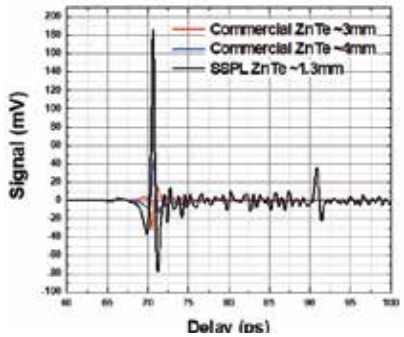


प्रतिरोधकता के लिए I-V मापन

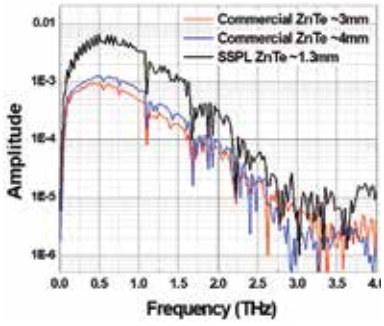
चित्र १२. संवृद्ध जिंक टेल्युराईड सामग्री का लक्षणवर्णन



THz संचरण की तुलना



खोज किए गए THz तरंग की तुलना (समय क्षेत्र)



खोज किए गए THz तरंग की तुलना (आवृति क्षेत्र)

चित्र १३. THz अनुप्रयोगों के लिए मूल्यांकन

प्रकार II तनावपूर्ण स्तर सुपरलैटिस (टी 2 एसएल)-आधारित सामग्रियां

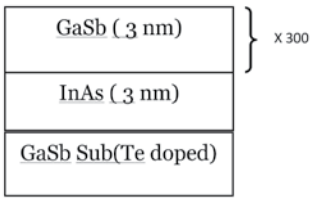
वर्तमान तीसरी पीढ़ी के अवरक्त फोटोन डिटेक्टर, जो बड़ी संख्या में पिक्सल, उच्च फ्रेम दरें, बेहतर तापीय विभेदन तथा बहु–रंग कार्यत्मकता एवं अन्य ऑन–चिप फलनों जैसी बढ़ती क्षमताएं उपलब्ध कराते हैं, मरकरी कैडमियम टेलुराइड, क्वांटम वेल (क्यूडब्ल्यूआईपी) या क्वांटम डॉट (क्यूडीआईपी)–आधारित संरचनाओं पर आधारित हैं। आईआर सेंसर जो एक नई प्रकार की सामग्री, जिसे प्रकार II तनावपूर्ण स्तर (टी 2 एसएल) सुपरलैटिस संरचना के रूप में जाना जाता है, के आधार पर इन सामग्रियों द्वारा उत्पन्न कई कठिनाइयों से निपटने का पूर्वानूमान करते हैं और बेहतर प्रदर्शन दिखाते हैं।

ये कृत्रिम रूप से अभियंत्रित सामग्रियां होती हैं जिनमें उचित इंटरफेसों एवं एक विशिष्ट प्रकार–II के बैंड संरेखण के साथ InAs एवं GaInSb/GaSb की सैंकड़ों की संख्या में वैकल्पिक पतली परतें होती हैं, जो बैंड अंतराल को संघटक परतों की मोटाई द्वारा पूर्ण रूप से नियंत्रित करने में सुविधा प्रदान करती है। इसे प्राप्त करने हेतु वांछित प्रौद्योगिकी आण्विक बीम एपिटैक्सी (एमबीई) है, जिससे भिन्न संघटन या डोपिंग के साथ सामग्रियों की उचित क्रिस्टलीय परतों को अणु स्तर विभेदन के साथ संवृद्ध किया जा सकता है। एसएसपीएल ने इस सामग्री प्रौद्योगिकी को विकसित करने के उद्देश्य से एक आण्विक बीम एपीटैक्सी प्रणाली का क्रय किया है (चित्र 14)।

चित्र १४. टी २ एसएल संवृद्धि के लिए आण्विक बीम एपीटैक्सी प्रणाली

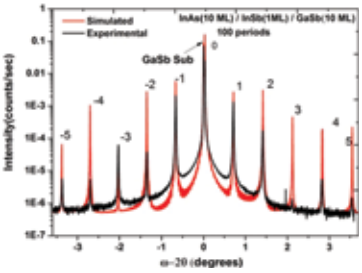
टी 2 एसएल–आधारित आईआर डिटेक्टर प्रौद्योगिकी की सफलता की कुँजी है, कई माइक्रॉन थिक परफैक्ट तनाव संतुलित सुपरलैटिस स्तरों की संवृद्धि, जो डिटेक्टर संरचना के सक्रिय घटक के रूप में कार्य करती हैं। इस संबंध में कई ऐसी चुनौतियां हैं जिन्हें इंटरफेस विषमता का नियंत्रण, त्रुटियों से बचने हेतु इंटरफेस अभियांत्रिकी के माध्यम से संपूर्ण तनाव का संतुलन, पृथक्करण संबंधी मुद्दों का नियंत्रण और समूह III एवं V अणुओं के अंतःमिश्रण से निपटना जरूरी है। वांछित विनिर्देश प्राप्त करने हेतु संवृद्धि स्थितियों पर कड़ा नियंत्रण अति महत्वपूर्ण है।

पूर्ण रूप से तनाव संतुलित टी 2 एसएल संरचनाओं, जिनके अंतर्गत InSb इंटरफेस के साथ 300 पीरिएड (~ 1.8 μm) सन्निहित हैं, को एसएसपीएल में सफलतापूर्वक संवृद्ध किया गया है। एमबीई का प्रयोग करके एसएसपीएल में संवृद्ध एक प्राथमिक अनडोप्ड टी 2 एसएल संरचना का आरेख चित्र 15 में दिया गया है। चित्र 16 एक 2 इंच के GaSb वेफर पर संवृद्ध INAs/GaSbSL की इमेज को दर्शाता है। हाइ रिजोल्यूशन एक्सरे विवर्तन (एचआरएक्सआरडी) एवं टीईएम के परिणामों ने अवस्तर के साथ सुपरलैटिस की एक छोटी लैटिस असंगतता तथा तीक्ष्ण इंटरफेसिस के साथ उत्कृष्ट क्रिस्टलीय गुणवत्ता प्रदर्शित करता है (चित्र 17)। आणविक उपायों के साथ नमूने के पृष्ठ मृदु आकारिकी को एएफएम मापों में इंगित किया गया है (चित्र 18)। पृष्ठ दर्पण की तरह दिखाई देता है तथा उसमें कोई सूक्ष्मदर्शीय विकृतियां नहीं हैं, जैसे कि प्रकाशिक सूक्ष्मदर्शी में प्रेक्षित किया गया था। नमूनों पर एफटीआईआर मापों ने 5.6 μm की अवशोषण एज तथा उच्च क्वांटम ट्रांजिशन इंगित किए (चित्र 19 एवं चित्र 20)।

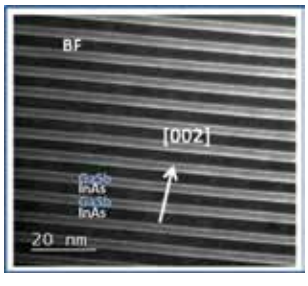


चित्र १५. मानक टी २ एसएल परत का आरेख

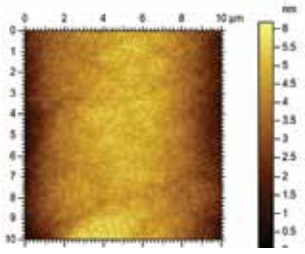
चित्र १६. संवृद्ध InAs/GaSb एसएल एपिलेयर



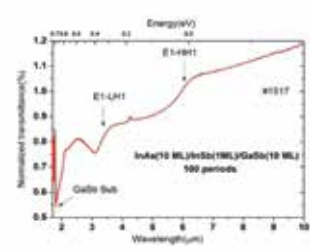
चित्र १७. १०० पीरियड InAs/GaSb सुपरलैटिस परत का उच्च विभेदन एक्सरे विवर्तन



चित्र १८. १०० पीरियड InAs/GaSb सुपरलैटिस परत की टीईएम इमेज

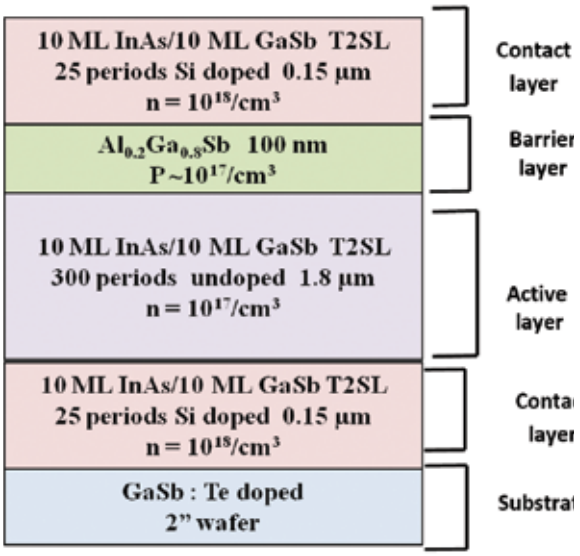


चित्र १९. १०० पीरियड InAs/GaSb सुपरलैटिस परत पृष्ठ रुक्षता: ०.३६ मिमी की आणविक बल सूक्ष्मदर्शी इमेज



चित्र २०. १०० पीरियड InAsGaSb सुपरलैटिस परत में सामान्यकृत संप्रेषण

प्रयोगशाला ने पूर्ण डिटेक्टर संरचना को भी सफलतापूर्वक संवृद्ध किया है, जिसमें एक बेरियोड प्रकार की बनावट है, जिसे अपने बेहतर प्रदर्शन तथा सामग्रियों की उपलब्धता और लगभग एक समान लैटिस स्थिरांकों एवं बैंड ऑफसेट में बड़े अंतर के कारण पसंद किया जाता है। एक पतली सक्रिय परत, संपर्क परतों और एक AlGaSb-आधारित बाधक परत को चित्र 21 में दर्शाया गया है। संपूर्ण डिटेक्टर संरचना के लिए वैयक्तिक परतों को पूर्ण रूप से अंशांकित किया गया।



चित्र २१. एनबीएन बेरियोड-आधारित टी२एसएल डिटेक्टर संरचना

एमबीई संवृद्ध टी2एसएल बेरियोड हेटरो–संरचनाओं के आधार पर एकल तत्व डिटेक्टरों को फैब्रीकेट किया गया। एकल तत्व डिटेक्टरों के डार्क एवं फोटो करंट अभिलक्षणों को प्रदर्शित किया गया। टी2एसएल–आधारित एमडब्ल्यूआईआर का फैब्रीकेशन प्रक्रियाधीन है। यह टी2एसएल–आधारित डिटेक्टरों के विकास में एक महत्वपूर्ण उपलब्धि है।

सिलिकॉन कार्बाइड (एसआईसी) वेफर

सिलिकॉन कार्बाइड (एसआईसी) वेफर एक विनाशी मिश्रण अर्द्धचालक सामग्री है जिसके अंतर्निहित गुणधर्म सिलिकॉन की तुलना में उच्चत्तर प्रदर्शन एवं दक्षता उपलब्ध कराते हैं। यह पारंपरिक सिलिकान आधारित ऊर्जा उपकरणों की तुलना में कई लाभ प्रदान करती है, जैसे कि आईजीबीटी एवं एमओएसएफईटी। इन उपकरणों ने लंबे समय से बाजार पर अपना वर्चस्व रखा है, क्योंकि इनकी लागत किफायती है तथा इनके विनिर्माण की प्रक्रिया भी सामान्य है। एसआईसी द्वारा प्रदान किए गए मुख्य लाभों को निम्न प्रकार सारांशीकृत किया जा सकता है:

- उच्च स्विचिंग आवृत्ति
- उच्च परिचालनीय तापमान
- बेहतर दक्षता
- न्यून स्विचिंग हानियां
- उच्च ऊर्जा धनत्व
- अपचयित आकार एवं वजन
- बेहतर ऊष्मीय प्रबंधन

एसआईसी उच्च–ऊर्जा के आरएफ उपकरणों हेतु गैलियम नाइट्राइड की संवृद्धि के लिए भी अवस्तर है। प्रयोगशाला एसआईसी बल्क एकल क्रिस्टल वृद्धि प्रक्रिया के विकास में तथा स्वदेशी रूप से वेफर प्रौद्योगिकी के फैब्रीकेशन में कार्यरत है। एसएसपीएल ने 4एच–एसआईसी बल्क वृद्धि प्रौद्योगिकी (4'' व्यास, 4एच–पॉलीटाइप) के विकास के लिए तथा एपि–रेडी वेफर फैब्रीकेशन प्रक्रम के लिए पूर्ण अवसंरचना के विकास हेतु सुविधाएं स्थापित की हैं। 4'' एसआईसी वेफर्स के लिए भारत में स्थापित यह विशिष्ट सुविधा केंद्र है।

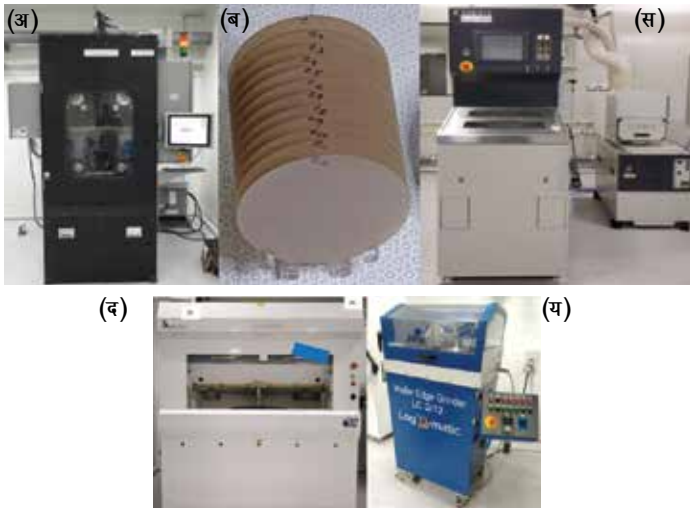
चूंकि एसआईसी सामरिक सामग्रियां हैं, इसलिए इसकी तकनीकी जानकारी उपलब्ध नहीं है और इसके प्रक्रम व प्रसंस्करण की कार्यविधियां कंपनियों द्वारा व्यापारिक दृष्टि से गोपनीय रखी जाती हैं। यह कार्य देश के भीतर सीमित ज्ञान साझाकरण के कारण और भी जटिल बन जाता है।

चित्र २२. पीवीटी संवृद्धि रिएक्टर

चित्र २३. संवृद्ध एसआईसी एकल क्रिस्टल बाउल

एसआईसी संवृद्धि के लिए आमतौर पर अपनाई जा रही तकनीक भौतिक वाष्प अपवहन (पीवीटी) है जिसे बीजयुक्त उर्ध्वपातन तकनीक के रूप में भी जाना जाता है, जिसमें सबलाइमिंग आणविक प्रजातियों का एक तापमान प्रवणता में पारगमन के द्वारा 2500–2700K पर संवृद्धि होती है, जिसके फलस्वरूप तुलनात्मक रूप से कम तापमान पर धारित एसआईसी बीज का जमाव होता है, जैसा कि चित्र 22 एवं चित्र 23 में दर्शाया गया है।

एसआईसी की बल्क संवृद्धि के उपरांत, क्रिस्टल विभिन्न प्रक्रियाओं से गुजरता है, जैसे कि संवृद्ध बाउल की बेलनाकार ग्राइंडिंग, पिण्ड की वेफर स्लाइसिंग, एज ग्राइंडिंग, वेफर सतह ग्राइंडिंग एवं पॉलिशिंग तथा अंततः वेफर्स की केमो–यांत्रिक पॉलिशिंग। प्रत्येक प्रक्रिया अपनी कठोरता (तीसरी सबसे अधिक कठोर सामग्री) तथा रासायनिक अक्रियता के कारण काफी चुनौतीपूर्ण है। एसएसपीएल में स्थापित वेफर फैब्रीकेशन सुविधाएं चित्र 24 एवं चित्र 25 में दर्शाई गई हैं।



चित्र २४. (अ) डायमंड वायर मल्टी-वायर सॉ मशीन, (ब) एसआईसी पिण्ड से एसआईसी वेफर, (स) वेफर पृष्ठ ग्राइंडर, (द) सीएमपी मशीन, (य) वेफर एज ग्राइंडर

एसआईसी पॉलीटाइप	4H
वेफर व्यास	4 inch
वेफर की मोटाई	350-500 μm
प्रतिरोधकता	≥10^5 ohm-cm
माइक्रोपाइप घनत्व	≤10 cm^{-2}
पृष्ठ की रुक्षता	<0.5 nm

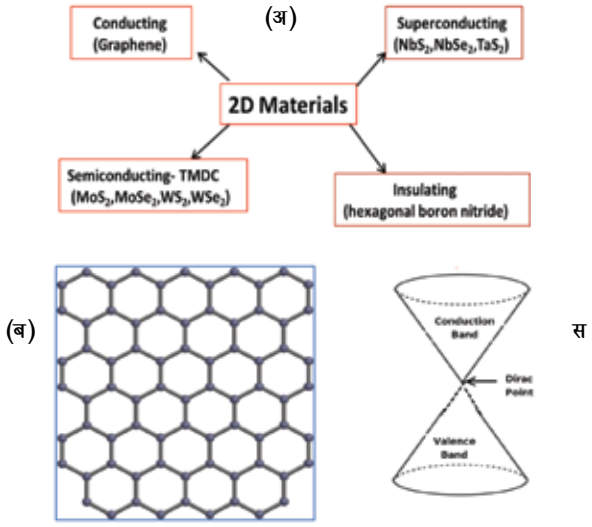
चित्र २५. डायमीटर ४एच-पॉलीटाइल सेमी-इन्सुलेटिंग एसआईसी वेफर्स एवं विनिर्देश

ग्राफीन एवं अन्य द्विविमीय सामग्रियां

द्विविमीय सामग्रियां क्रिस्टलीय फिल्में हैं, जो अणुओं की एकल परत से स्थापित होती हैं, इनकी लंबाई एवं चौड़ाई होती है, परंतु गहराई नहीं होती है। इन सामग्रियों में, इलेक्ट्रॉन्स या रंध्र एक दो विमीय समतल में निर्बाध रूप से प्रतिगमन करते हैं, लेकिन तीसरी दिशा में उनका प्रतिगमन प्रतिबंधित होता है। द्विविमीय सामग्रियों के विशिष्ट विद्युतीय एवं प्रकाशिकी गुणधर्म क्वांटम परिसीमित प्रभाव के कारण उत्पन्न होते हैं, जिसमें इलेक्ट्रॉन्स/रंध्र उक्त सामग्री के भीतर एक या उससे अधिक परिमापों में स्थानिक रूप से परिसीमित रहते हैं और उनमें भिन्न इलेक्ट्रॉनिक ऊर्जा स्तर होते हैं। कतिपय सामग्रियो की मोटाई को एक अणु परत के पैमाने तक पतला किया जा सकता है और इस प्रकार की सामग्रियों में विभिन्न प्रकार के रुचिकर गुणधर्म उत्पन्न होते हैं, जो बल्क सामग्री से काफी भिन्न हैं।

द्विविमीय सामग्रियों की इलेक्ट्रॉनिक संरचना को परत की संख्या, परतों के बीच सापेक्षिक अभिविन्यास, इलेक्ट्रिक फील्ड एवं स्ट्रेन के आधार पर काफी हद तक बदला जा सकता है। भिन्न द्विविमीय सामग्रियों की एक दूसरे के सिरोबिंदु पर परत स्थापित करके, हम हेटरो–संरचनाएं उत्पादित कर सकते हैं, जिनमें नवीनतम विद्युतीय, प्रकाशिकी एवं ऊष्मीय गुणधर्म होते हैं। अभी तक द्विविमीय सामग्रियों की भिन्न श्रेणियों की खोज की गई है। इनमें से कुछ सामग्रियां चालक (ग्राफीन), तापरोधक (hBN) या अर्द्धचालकीय (टीएमडीसी–आधारित द्विविमीय सामग्रियां), आदि प्रकृति की हैं, चित्र 26 (क) विभिन्न प्रकार की द्विविमीय सामग्रियां परिलक्षित करती हैं। ट्रांजिशन मेटल डाइकैलकोजिनाइडेस (टीएमडीसी)–आधारित द्विविमीय सामग्रियां एक विशिष्ट बैंड अंतराल के साथ अपनी अर्द्धचालकीय अर्थात सेमीकंडक्टिंग प्रकृति के कारण काफी लोकप्रिय भी हैं।

ग्राफीन एक षटकोणीय लैटिस संरचना में व्यस्थित कार्बन अणुओं की एक अणु के समान पतली परत है। ग्राफीन की लैटिस संरचना तथा बैंड संरचना को चित्र 26 (ब) एवं (स) में दर्शाया गया है। ग्राफीन में कई रुचिकर विद्युतीय गुणधर्म हैं, यथा अति उच्च संवाहक सांद्रण ($1x10^{14}$ सेमी$^{-2}$), अति उच्च गतिशीता (> 20,000 सेमी^{2}/वी.एस), एम्बिपोलर चार्ज ट्रांसपोर्ट, उच्च संतृप्तीकरण वेग (10^6 मी/से), नगण्य प्रभावकारी द्रव्यमान, सममित शंकुकाकर बैंड संरचना (चालन अथवा प्रवाहकत्व बैंड एवं वैलेंस बैंड डिरैक बिंदु पर मिलते हैं)। इलेक्ट्रॉन द्रव्यमान रहित डिरैक फर्मियोन्स की तरह संव्यवहार करते हैं, क्योंकि इलेक्ट्रॉन प्रभावी द्रव्यमान शून्य होता है। इन रुचिकर गुणधर्मों के कारण, ग्राफीन THz से लेकर दृश्य विकिरण के दायरे में इलेक्ट्रोचुंबकीय विकिरण के साथ अभिक्रिया कर सकते हैं। अवरक्त एवं दृश्य परिसर में ग्राफीन द्वारा अवशोषण सामान्य व्यापकता में केवल लगभग 2.3 प्रतिशत है, जो कि आंतरिक बैंड संक्रमणों द्वारा सीमित है। न्यूनेतर आवृत्ति



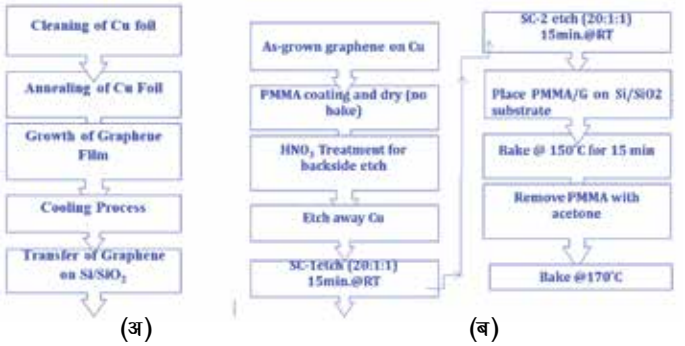
चित्र २६. (अ) विभिन्न द्विविमीय सामग्रियां (ब) ग्राफीन में सी परमाणु (स) ग्राफीन बैंड संरचना

परिसर (THz क्षेत्र एवं लगभग अवरक्त) में, अंतरा–बैंड संक्रमण अपना प्रभुत्व बनाए रखते हैं; THz परिसर में, ग्राफीन 100 प्रतिशत इंसिडेंट THz फोटोन को अवशोषित कर सकता है।

टीएमडीसी–आधारित द्विविमीय सामग्रियां अर्द्धचालक द्विविमीय सामग्रियां हैं, जिनका शून्येत्तर बैंड अंतराल एवं उच्च ऑन/ऑफ अनुपात ($\sim 10^4$) होता है। टीएमडीसी द्विविमीय सामग्रियों में एम अणुओं की षटकोणीय परतें होती हैं, जो कैल्कोजन अणुओं की दो परतों के बीच मौजूद होती हैं और कंपाउंड MX_2 स्थापित करती हैं। इन सामग्रियों में मोटाई आश्रित बैंड गैप गुणधर्म होते हैं। जब डीएमडीसी सामग्री की मोटाई को 1 माइक्रॉन से घटाकर MX_2 की एक मोनोलेयर किया जाता है, तब अप्रत्यक्ष से प्रत्यक्ष बैंड अंतराल में संक्रमण होता है। बल्क MoS_2 में 1.2 eV का एक अप्रत्यक्ष बैंड अंतराल होता है, जबकि एकल परत वाले MoS_2 में 1.8 eV का एक प्रत्यक्ष बैंड अंतराल होता है। इन सामग्रियों के आप्टोइलेक्ट्रॉनिक अनुप्रयोग हेतु तथा डिजिटल इलेक्ट्रॉनिक अनुप्रयोग के लिए नए अवसर होते हैं।

ग्राफीन एवं द्विविमीय सामग्रियों की गतिविधि

प्रयोगशाला भिन्न प्रकार की द्विविमीय सामग्रियों पर कार्य रह रही है, मुख्य रूप से ग्राफीन एवं टीएमडीसी सामग्रियां (MoS_2)। एकल परत ग्राफीन फिल्मों को एक न्यून दाब के रासायनिक वाष्प जमाव (एलपीसीवीडी) प्रणाली का प्रयोग करके संवृद्ध किया गया तथा ग्राफीन आधारित THz उपकरणों, मुख्य रूप से THz डिटेक्टर, THz मॉड्यूलेटर, ग्राफीन एफईटी के फैब्रीकेशन का कार्य प्रगति में है। चित्र 27 में एलपीसीवीडी में कापर फॉइल्स पर ग्राफीन के जमाव हेतु फ्लोचार्ट को दर्शाया गया है। ग्राफीन को

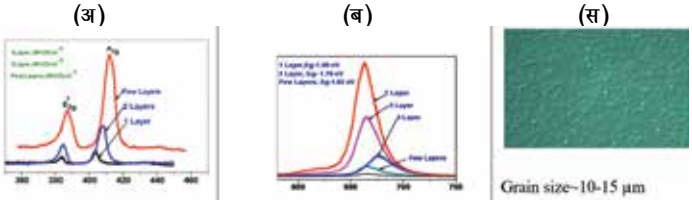


चित्र २७. (अ) ग्राफीन संवृद्धि (ब) कॉपर की इचिंग के लिए संशोधित आरसीए तकनीक के लिए फ्लोचार्ट

~ 1000 °C के तापमान पर मीथेन/हाइड्रोजन गैस मिश्रण की मौजूदगी में कॉपर फॉइल पर संवृद्धकिया जाता है। तत्पश्चात, ग्राफीन को विभिन्न ग्राफीन–आधारित उपकरणों के फैब्रीकेशन के लिए सिलिकॉन अवस्तर में स्थनांतरित किया जाता है।

एमओएस$_2$ की एकल परत/बहु–परतों को एमओएस$_2$–आधारित एफईटी विकसित करने हेतु 2–जोन सीवीडी प्रणाली का प्रयोग करके संचित किया जाता है। रमन स्पेक्ट्रा विश्लेषण ग्राफीन एवं टीएमडीसी–आधारित द्विविमीय फिल्मों की एक परत, द्विपरत/बहुपरत संवृद्धि का पुष्टिकरण करता है; लक्षणवर्णन तकनीकों, जैसे कि एफईएसईएम, एएफएम, एक्सपीएस, एसटीएम का प्रयोग इन द्विविमीय सामग्रियों के सूक्ष्म–संरचनात्मक, प्रकाशिकी एवं इलेक्ट्रॉनिक गुणधर्मों का निर्धारण करने के लिए किया जाता है। एलपीसीवीडी संवृद्ध ग्राफीन के विस्तृत लक्षणवर्णन को चित्र 28 में दर्शाया गया है। MoS_2 एकल परत/बहुपरतीय फिल्मों के लक्षणवर्णन के परिणामों को चित्र 29 में दर्शाया गया है।

चित्र २८. (अ) रमन स्पेक्ट्रा (ब) एफईएसईएम और (स) ऑप्टिकल माइक्रोग्राफ ग्राफीन के दानों को दर्शाते हुए



चित्र २९. (अ) रमन स्पेक्ट्रा (ब) फोटोलुमिनिसेंस स्पेक्ट्रा MoS_2 एकल परतीय/बहुपरतीय फिल्में, और (स) ऑप्टिकल माइक्रोग्राफ MoS_2 एकल परत

ग्राफीन एवं द्विविमीय सामग्रियों के अनुप्रयोग

ग्राफीन THz उपकरणों के विविध अनुप्रयोग हैं, जैसे कि संग्राम रासायनिक युद्धास्त्र अभिकारकों की स्पेक्ट्रोस्कॉपिक पहचान करने में; मातृ–भूमि की सुरक्षा हेतु व्यापक प्रतिबिंबन व इमेजिंग में; और उच्च थ्रोपुट सुरक्षित संचार में। ग्राफीन THz उपकरण विमान से उपग्रह; उपग्रह से उपग्रह; और सैन्य टुकड़ियों के लिए संचार में भी बड़ी भूमिका निभा सकते हैं क्योंकि THz सिग्नल किसी निश्चित दूरी पर दुर्बल हो जाते हैं, इसलिए दुश्मन एक निश्चित दूरी से छुपकर बातचीत नहीं सुन सकता है।

टीएमडीसी–आधारित द्विविमीय सामग्रियां प्रबल फोटोलुमिनेसेंस उत्सर्जन प्रदर्शित करती हैं और उनके प्रकाश उत्सर्जक गुणधर्म व्यापक रूप से प्रयोग किए जा सकते हैं। हेटरोजिनस द्विविमीय–स्टैक्ड सामग्रियां भावी संचार और संगणन अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त प्रौद्योगिकी सृजित कर सकती हैं।

एसएसपीएल में सामग्री अनुसंधान के लिए लक्षणवर्णन सुविधाएं

सामग्री लक्षणवर्णन उपकरणों के फैब्रीकेशन में सक्रिय भूमिका निभाता है। सामग्री प्राचल, जैसे कि सामग्री के संघटन, संरचना, आकारिकी, क्षति व त्रुटि, अपद्रव्यों, बैंड अंतराल, प्रतिरोधकता, गतिशीलता व जीवन चक्र, आदि को तथा उन उपकरणों के प्रदर्शन को मोटे तौर पर वर्णित करते हैं जिन्हें इन प्राचलों के आधार पर फैब्रीकेट किया जाता है। सामग्रियों का लक्षणवर्णन विभिन्न तकनीकों का प्रयोग करके किया जाता है। सभी तकनीकों में, प्रोबिंग इलेक्ट्रॉन, फोटोन, इयॉन से निर्मित की जाती है जो अंततः प्रतिदर्श अथवा नमूने से अभिक्रिया करते हैं। विभिन्न संयोजनों में परिणामी बीम अर्थात किरण.पुंज, जैसे कि इलेक्ट्रॉन्स, फोटोन्स, आयनों का प्रयोग विभिन्न सामग्री पाचल प्राप्त करने के लिए किया जाता है।

बल्क क्रिस्टल एवं एपीटैक्सीय फिल्मों की संवृद्धि के लिए किसी भी कंपाउंड अर्द्धचालक का तात्विक संघटन सबसे जरूरी एवं प्राथमिक सूचना होती है। विभिन्न गुणधर्म, जैसे कि बैंड अंतराल, कैरियर कॉन्सन्ट्रेशन, आदि फिल्मों के संघटन और उनके विचलन पर प्रबलता से निर्भर रहते हैं। इसके अलावा, फिल्म की संघटनीय समांगता भी मुख्य आवश्यकताओं में से एक है। डोपेंट की सांद्रता एवं अवांछित अशुद्धताओं तथा उनकी प्रोफाइल का ज्ञान उपकरणों के फैब्रीकेशन के लिए महत्वपूर्ण कारक हैं। इस प्रयोजन हेतु एनर्जी डिसपर्सिव (डब्ल्यूडीएस/ईडीएस) एक्सरे स्पेक्ट्रोस्कोपी एवं सहायक आयन मास स्पेक्ट्रोस्कोपी (एसआईएमएस) आदि का प्रयोग किया जाता है। आबंधन अर्थात बांडिंग की रासायनिक स्थिति, पृष्ठ पर अवशोषित अपद्रव्यों, पृष्ठ संघटन, आदि की प्रोबिंग एक्सरे फोटोइलेक्ट्रॉन स्पेक्ट्रोस्कोपी (एक्सपीएस), आगेर इलेक्ट्रॉन स्पेक्ट्रोस्कोपी (एईएस) एवं अल्ट्रा वायलेट फोटोइलेक्ट्रॉन स्पेक्ट्रोस्कोपी (यूपीएस) का प्रयोग करके की जाती है। संरचनात्मक सूचना, क्रिस्टलीय असंगतता एवं प्रावस्था अभिनिर्धारण हेतु एक्सरे विवर्तन विश्लेषण का प्रयोग किया जाता है। यह सर्वविदित है कि अर्द्धचालक सामग्रियों में दोष सामग्रियों के गुणधर्मों को प्रतिकूल रूप से प्रभावित करते हैं और ऐसी सामग्री उत्पन्न कर सकते हैं जो उपकरण के फैब्रीकेशन के लिए उपयुक्त नहीं होती हैं। इस प्रयोजन हेतु, ट्रांसमिशन इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (टीईएम) का भी प्रयोग किया जाता है। कॉम्पलेक्स रिफ्रेक्टिव सूचकांक के स्पेक्ट्रल विचलन के निर्धारण के लिए प्रकाशिकी अथवा ऑप्टिकल तकनीकों, यथा पारगम्यता, परावर्तकता एवं लुमिनेसेंस का प्रयोग किया जाता है ताकि बैंड अंतराल, अपद्रव्यों, आदि का निर्धारण किया जा सके। विभिन्न लैटिस कंपनों के निर्धारण में रमन स्पेक्ट्रमिकी मापनों का भी प्रयोग किया जाता है। तैयार किए गए पृष्ठ अर्थात सरफेस की गुणवत्ता की निगरानी हेतु पृष्ठ आकारिकी रुक्षता का लक्षणवर्णन करने की आवश्यकता होती है।

सामग्री के लक्षणवर्णन के प्रयोजनों के लिए कुछ टूल्स निम्न प्रकार हैं:

- सहायक आयन मास स्पेक्ट्रोमीटर (कैमका, आईएमएस 7एफ) – (एसआईएमएस)
- फील्ड एमिशन स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोप (ज़ीस एसयुपीआरए55)– (एफईएसईएम)

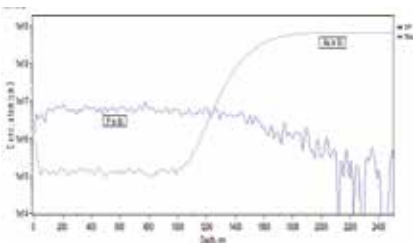
- बहु–तकनीक पृष्ठ विश्लेषण प्रणाली में डेप्थ प्रोफाइलिंग (ओमिक्रॉन ईएससीए) के साथ एक्सपीएस, ऑगेर (एईएस) एवं यूपी स्पेक्ट्रमिकी (यूपीएस) सन्निहत हैं
- उच्च विभेदन एक्सरे विवर्तन प्रणाली (पैनालिटिकल एक्स'पर्ट एमआरडी)– एचआरएक्सआरडी
- टीजीए सुविधा के साथ फोरियर ट्रांसफोर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्रोफोटोमीटर (600 आईआर माइक्रोस्कोप के साथ वेरियन 680 आईआर)– एफटीआईआर
- यूवी–विजिबल स्पेक्ट्रोफोटोमीटर (एजिलेंट: सीएआरवाई–300)
- डीप लेवल ट्रांजिएंट स्पेक्ट्रमिकी–डीएलटीएस
- न्यून तापमान एवं उच्च चुंबकीय फील्ड हाल मापन प्रणाली
- स्कैनिंग प्रोब माइक्रोस्कोप (एसपीएम) (कीसाइट 5600 एलएस)
- ट्रांसमिशन इलेक्ट्रौन माइक्रोस्कोपी (टीईएम)
- रमन स्पेक्ट्रोमीटर/फोटोलुमिनेसेंस (होरिबा जोबाइन यवोन प्रयोगशाला आरएएम एचआर इवोलुशन माइक्रो–रमन प्रणाली)

सहायक आयन मास स्पेक्ट्रोमीटर (एसआईएमएस)

अध्ययनगत प्रतिदर्श नेगेटिव ऑक्सीजन या पॉजिटिव सीसियम आयन के किरण पुंज/बीम द्वारा 0.5 keV से 20 keV के परिसर में कण क्षेपित होता है। कण क्षेपित सामग्री का एक छोटा अंश आयनीकृत रूप में हो सकता है, इसलिए इसे सहायक आयन का नाम दिया गया है। ये सहायक आयन तब एलिमेंट के सिग्नेचर का पारगमन करते हैं, जब उसका विश्लेषण एक मास स्पेक्ट्रोमीटर का प्रयोग करके किया जाता है। अणुओं का नियंत्रित परत दर परत कण क्षेपण और बेहतर मास रिजोल्यूशन इस तकनीक को डेप्थ प्रोफाइलिंग में उपयोगी बना देता है। इस तकनीक का प्रयोग करके तथा पीपीबी से पीपीएम खोज सक्षमता के साथ हाइड्रोजन से यूरेनियम तक सभी तात्विक मासिस का विश्लेषण किया जा सकता है। यह विश्लेषण विनाशी है और इसलिए यह मुख्य रूप से संवृद्धि के मानकीकरण, उपकरण के प्रक्रम और त्रुटि खोज में उपयोगी है। चित्र 30 में एसआईएमएस प्रणाली को तथा चित्र 31 में एसआईएमएस द्वारा सिलिकेट अवस्तर में डोप्ड फास्फोरस एवं आर्सेनिक डेप्थ प्रोफाइलिंग को दर्शाया गया है।

एसआईएमएस

चित्र ३०. एसआईएमएस प्रणाली



चित्र ३१. एक डोप्ड सिलिकॉन नमूने की डेप्थ प्रोफाइल

तकनीकी विशिष्टताएँ, एक नजर में

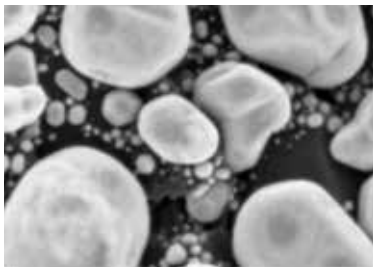
- एलिमेंट की रेंज: एच से यू; सभी आइसोटोप्स
- विनाशकता: हां, कण क्षेपण के दौरान सामग्री को हटा दिया जाता है
- रसायन आबंध सूचना: नहीं
- मात्रीकीकरण: आमतौर पर मानकों की आवश्यकता होती है
- खोज की सीमाएं: 10^{12}–10^{16} अणु प्रति घन सेमी (पीपीबी–पीपीएम)
- प्रोब की गहराई: 2 nm–100 μm (कण क्षेपण एवं डेटा संग्रहण समय पर आधारित)
- प्रोफाइलिंग गहराई: हां, कण क्षेपण प्रक्रिया द्वारा; रिजोल्यूशन 2 nm–30 nm
- पार्श्विक विभेदन: 1.2 μm
- इमेजिंग/मैपिंग: हां
- नमूना अपेक्षाएं: ठोस चालक एवं तापरोधक, विशेष रूप से 1–2.5 सेमी व्यास, 1–6 मि मी मोटाई, वैक्यूम संगतता के
- मुख्य उपयोग: ठोस सामग्रियों में संघटन और ट्रेस–स्तरीय अशुद्धताओं का मापन, जो की गहराई, बेहतरीन अन्वेषण सीमाओं, बेहतर गहराई रिजोल्यूशन का फलन है

फील्ड एमिशन स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोप

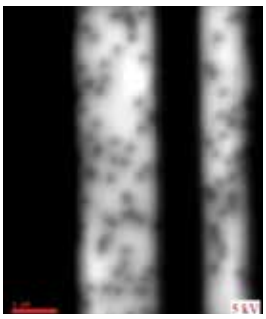
इस प्रणाली में, एक केन्द्रित परिष्कृत ई–बीम रास्टर नमूने को स्कैन करता है, जिसके पश्चात विभिन्न सिग्नल, जैसे कि सहायक इलेक्ट्रॉन, बैकस्कैटर्ड इलेक्ट्रॉन, कैथोडोलुमिनेसेंस, लक्षणीय एक्सरे, आदि सृजित होते हैं। इन सिग्नलों का उपयोग अनेक प्रकार की सूचना प्राप्त करने के लिए किया जा सकता है, जैसे कि पृष्ठ की आकारिकी, पृष्ठ की संरचना, रासायनिक संघटन, दोष–त्रुटि आदि के लिए। यह प्रणाली लगभग 15 Å के आकाशीय विभेदन अर्थात स्पेशियल रिजोल्यूशन देने में सक्षम है। तात्विक मैपिंग प्राप्त करने में बैकस्कैटर्ड इलेक्ट्रॉन का प्रयोग किया जाता है। लक्षणीय एक्सरे का विश्लेषण बहुचैनल एनालाइजर का प्रयोग करके किया जाता है ताकि गुणात्मक एवं मात्रात्मक संघटनात्मक विश्लेषण प्राप्त किया जा सके। चित्र 32 एसएसपीएल में एफईएसईएम प्रणाली को तथा चित्र 33 कण क्षेपित स्वर्ण कणों के 1 केवी पर एसईएम प्रतिबिंब को दर्शाता है। कैथोडोलुमिनेसेंस बैंड दर बैंड का विश्लेषण करने में और यूवी, दृश्य एवं नियर आईआर तरंग दैर्ध्य क्षेत्रों में अशुद्ध उत्सर्जन का विश्लेषण करने में उपयोगी है। भिन्न वेगवर्धक वोल्टेज का चयन करके, उत्सर्जन को भिन्न डेप्थ पर, आमतौर पर एक μm तक न्यूनीकृत किया जा सकता है। यह तकनीक सामान्य रूप से अविनाशी है। चित्र 34 गैलियम नाइट्राइड एपीटैक्सीय परत पर सीएल इमेज को दर्शाता है, जिसमें गहरे धब्बे गैलियम नाइट्राइड प्रतिदर्श मे मौजूद विस्थापनों को परिलक्षित करता है।

फील्ड एमिशन स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोप

चित्र ३२. एफईएसईएम प्रणाली



चित्र ३३. निक्षेपित स्वर्ण काणों के १ केवी पर एसईएम इमेज



चित्र ३४. गैलियम नाइट्राइड पर इमेज

तकनीकी विशिष्टताएँ, एक नजर में

एफईएसईएम

- मुख्य उपयोगः उच्च आवर्धन इमेजिंग एवं संघटन (एलिमेंटल) मैपिंग
- विनाशकताः नहीं, कुछ मामलों में इलेक्ट्रॉन बीम क्षति कर सकते हैं
- आवर्धन दायराः 10~100000,
- किरण पुंज ऊर्जा परिसरः 100 eV–30 keV
- प्रतिदर्श की आवश्यकताः कंडक्टिंग फिल्म; वैक्यूम संगत होना चाहिए
- प्रतिदर्श आकारः 0.1 मिमी से कम, 10 सेमी या उससे अधिक तक
- पार्श्विक विभेदनः सहायक इलेक्ट्रॉन मोड में 1.5 nm
- आबंध सूचनाः शून्य

ऊर्जा डिसपर्सिव स्पेक्ट्रोमीटर

- एलिमेंटों का परिसरः बोरोन से यूरेनियम तक
- विनाशकताः नहीं
- मात्रीकीकरणः मानकों के साथ सर्वश्रेष्ठ, हालांकि मानक से कम अपेक्षित विधियों का बड़े पैमाने पर प्रयोग किया जा रहा है
- यथार्थताः सामान्य रूप से 4.5%, सापेक्षिक, संकेंद्रण > 5% वजन
- खोज सीमाः Z>11 के साथ पृथक एलिमेंटों में वियोजित पीक्स के लिए 100–200 पीपीएम, न्यून-Z एवं अतिव्याप्त पीक्स के लिए 1–2% वजन
- प्रतिदर्श आवश्यकताएँः ठोस, पाउडर और संघटित; आकार केवल स्टेज द्वारा एसईएम में सीमित है

कैथिडो लुमिनेसेंस (सीएल)

- मुख्य उपयोगः विस्थापन घनत्व का आकलन, बैंड एज उत्सर्जन एवं त्रुटिपूर्ण संपदा का निर्धारण

बहु-तकनीक पृष्ठ विश्लेषण प्रणाली

बहु–तकनीक पृष्ठ विश्लेषणात्मक प्रणाली के अंतर्गत एक्सरे–फोटोइलेक्ट्रॉन स्पेक्ट्रोस्कोपी (एक्सपीएस), पराबैंगनी फोटोइलेक्ट्रॉन स्पेक्ट्रोस्कोपी (यूपीएस), और आगेर इलेक्ट्रॉन स्पेक्ट्रोस्कोपी (एईएस) अंतर्विष्ट हैं। डेप्थ प्रोफाइलिंग अणुओं के परतों को कण क्षेपित करके बनाई जाती है, जिसमें आयन गन का प्रयोग किया जाता है। यह प्रणाली शीर्षतम सिरोबिंदु पर उच्छादित पृष्ठ से तात्विक संघटन एवं रासायनिक आबंध पर सूचना उपलब्ध कराने में सक्षम है।

एक्सपीएस या ईएससीए एवं यूपीएस

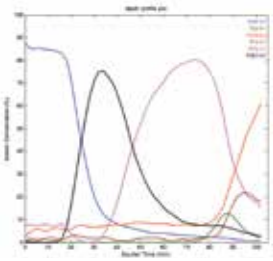
एक्सपीएस पृष्ठ पर मौजूद तत्वों के आबंध तथा रासायनिक स्थिति के बारे में उपयोगी सूचना प्रदान करता है। एक्सपीएस में, एक्सरे फोटॉन को एक परमाणु के अणु द्वारा नमूने के पृष्ठ पर अवशोषित किया जाता है। इससे शीर्ष इलेक्ट्रॉन्स (आंतरिक शेल) के उत्जर्सन उत्पन्न होते हैं। इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा को ऊर्जा परिक्षेपण विश्लेषण द्वारा अवधारित किया जाता है। उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा शेल इलेक्ट्रॉन की आबंधन ऊर्जा की सूचना को पारगमित करता है, जो किसी तत्व व एलिमेंट के अभिलक्षण का सूचक है। आबंधन ऊर्जा में एक छोटा सा बदलाव निश्चित तत्व के रासायनिक आबंधन के बारे में सूचना उपलब्ध कराता है। एक्सपीएस पृष्ठ के अविनाशी रासायनिक विश्लेषण के लिए बहुत उपयुक्त है। सूचना मुख्यतः 50 Å गहराई तक प्राप्त की जा सकती है। यद्यपि यह तकनीक अविनाशी है, लेकिन यह तब विनाशकारी बन जाती है जब आयन बीम स्पटरिंग डेप्थ प्रोफाइलिंग के लिए की जाती है। जब फोटॉन (पराबैंगनी) कम ऊर्जा का होता है, तब प्रणाली यूपी एसबन जाती है। यहां वैलेंस इलेक्ट्रॉन संरचना की खोज की गई है, जो कि इलेक्ट्रॉनिक संरचना के अध्ययन में उपयोगी है। चित्र 35 एसएसपीएल में एक्सपीएस प्रणाली को दर्शाता है, और चित्र 36 गैलियम नाइट्राइड/सैफायर पर ओहमिक संपर्क धातुओं की 36 एक्सपीएस डेप्थ प्रोफाइल को दर्शाता है।

एईएस

इस प्रणाली में अणुओं को सक्रिय करने हेतु एक केन्द्रित इलेक्ट्रॉन किरण–पुंज (जिसके ऊर्जा का परिसर 2.25 keV है) का प्रयोग किया जाता है। जब इलेक्ट्रॉन के उत्सर्जन के कारण शीर्ष स्तरीय आयनीकरण घटित होता है, तब इलेक्ट्रॉन द्वारा उच्च ऊर्जा शेल से विश्रांति प्रक्रिया प्रारंभ होती है। उक्त प्रक्रिया में, विश्रांति प्रक्रिया में प्रतिभाग कर रहे इलेक्ट्रॉन द्वारा प्राप्त ऊर्जा समान या भिन्न स्तर के इलेक्ट्रॉन में परिवर्तित हो सकती है। उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन आगेर ऊर्जा के अभिलक्षण का होगा। आगेर इलेक्ट्रॉन आव्यूह में एक एलिमेंट के सिग्नेचर का पारगमन करता है। आगेर इलेक्ट्रॉन की यथार्थ ऊर्जा का उपयोग रासायनिक सूचना प्राप्त करने के लिए किया जा सकता है।

बहु-तकनीक पृष्ठ विश्लेषण प्रणाली (एक्सपीएस, एईएस, यूपीएस)

चित्र ३५. एसएसपीएल में एक्सपीएस प्रणाली



चित्र ३६. गैलियम नाइट्राइड/सैफायर पर ओहमिक कॉन्टेक्ट धातुओं की एक्सपीएस डेप्थ प्रोफाइल

तकनीकी विशिष्टताएँ, एक नजर में

- एलिमेंट का परिसरः सभी, हाइड्रोजन, और हेलियम को छोड़कर
- विनाशकताः नहीं, कुछ किरण–पुंज एक्सरे संवेदनशील सामग्रियों को क्षति पहुंचा सकती हैं
- तात्विक विश्लेषणः हां, मानकों के बिना अर्द्ध–मात्रात्मक; मानकों के साथ मात्रात्मक, और ट्रेस तत्वों के लिए मात्रात्मक नहीं
- रासायनिक स्थितिः सूचना हां
- अन्वेषी डेप्थः 5–50 Å
- डेप्थ प्रोफाइलिंगः हां, शीर्ष से 50 Å; उच्च गहराई को कण क्षेपण की आवश्यकता होती है
- डेप्थ विभेदनः स्थितियों के आधार पर, Å के कई दशांकों के कुछ
- पार्श्व विभेदनः 5 μm से 75 μm तक; विशेष यंत्रों में 5 μm
- प्रतिदर्श आवश्यकताएंः सभी वैक्यूम–संगत सामग्रियां; सपाट नमूने श्रेष्ठ होते हैं; स्वीकृत आकार निश्चित यंत्र पर निर्भर करता है
- मुख्य उपयोगः शीर्ष 30 Å में तात्विक एवं रासायनिक अवस्था संघटन का निर्धारण

उच्च विभेदन एक्सरे विवर्तन प्रणाली

उच्च विभेदन एक्सरे विवर्तन एक सशक्त टूल है जिससे अर्द्धचालक बल्क एकल क्रिस्टलों की क्रिस्टलीय गुणवत्ता का तथा एपीटैक्सीय परतों, मल्टीलेयर एपीटैक्सीय फिल्म की मोटाई, फिल्म के संघटन एवं स्ट्रेन के लिए अविनाशी अन्वेषण किए जाते हैं। इस प्रणाली में, आपतित एक्सरे किरण–पुंज (तरंग दैर्ध्य 1.54 Å Cu-Kα) एक 4 बाउंस 4–क्रिस्टल बार्टल्स मोनोक्रो–कॉलीमेटर पर गिरता है, जिसमें लगभग 12 आर्क–सेकंड का अपसरण होता है। प्रतिदर्श को छः अक्षों की चलन गतियों यानी x, y, z, ψ (घूणन), φ (टिल्ट) और ω (डोलनिक कोण) का प्रयोग करके आपतित के संबंध में इष्टतमीकृत किया जा सकता है ताकि किसी समतल से विवर्तन प्राप्त करने हेतु ब्राग स्थिति की पूर्ति की जा सके। विवर्तित एक्सरे डिटेक्टर से एकत्र किए जाते हैं। चित्र 37 में एसएसपीएल में एक्सआरडी/एचआरएक्सआरडी प्रणाली को दर्शाया गया है।

विवर्तित किरण–पुंज के मापन हेतु निम्नलिखित दो प्रकार की व्यवस्थाओं का उपयोग किया जाता है:

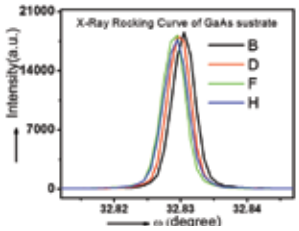
एक्सरे डोलनिक वक्र मापन के लिए डोलनिक वक्र व्यवस्था, जब एक्सरे प्रतिदर्श पर गिरता है तथा ब्राग कोण के साथ स्कैन होता है और विवर्तित एक्सरे को डिटेक्टर द्वारा 1^{o} के स्वीकार्य कोण के साथ खोजा जाता है। यह मापन एपीटैक्सीय फिल्मों के प्रतिदर्शों की क्रिस्टलीयता और संघटन एवं मोटाई की गुणवत्ता का विश्लेषण करने में उपयोगी होता है।

तिहरा अक्ष मापन ऐसी प्रक्रिया है जिसमें डिटेक्टर के समक्ष एक वैश्लेषक क्रिस्टल के रूप में एक एकल चैनल कट क्रिस्टल जीई (220) का प्रयोग किया जाता है। यह व्यवस्था डिटेक्टर के स्वीकारिता कोण को कम करके 12 आर्क सेकंड कर देती है, और विवर्तित किरण–पुंज में कोणीय विभेदन में सुधार लाती है।

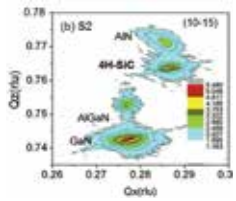
चित्र 38 क्रिस्टलीय उपयुक्तता मूल्यांकन के लिए GaAs अवस्तर के एक्सरे डोलनिक वक्र को दर्शाता है। चित्र 39 में एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड/गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी संरचना की व्युत्क्रम आकाशीय मैपिंग को दर्शाया गया है, जबकि चित्र में गैलियम नाइट्राइड एवं एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड व्युत्क्रम आकाशीय लैटिस कॉन्टोर अधोलंब रूप में संरेखित हैं। यह इस बात को दर्शाता है कि एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड लेयर गैलियम नाइट्राइड बफर लेयर के संदर्भ में पूर्ण रूप से निरूद्ध है।

एक्सआरडी/एचआरएक्सआरडी

चित्र ३७. एक्सआरडी/एचआरएक्सआरडी प्रणाली



चित्र ३८. GaAs का एक्सरे डोलिक वक्र



चित्र ३९. एल्युमिनियम गैलियम नाइट्राइड/ गैलियम नाइट्राइड एचईएमटी संरचना की व्युत्क्रम आकार मैपिंग

तकनीकी विशिष्टताएँ, एक नजर में

- एलिमेंटों का परासः सभी, लेकिन एलिमेंट विशिष्ट नहीं। सामग्री प्रावस्था का निर्धारण किया जा सकता है
- अन्वेषी डेप्थः प्रारूपिक रूप से कुछ μm, लेकिन सामग्री निर्भर
- अन्वेषण सीमाएंः सामग्री निर्भर, लेकिन दो प्रावस्था मिश्रण में ±3 %
- विनाशकताः नहीं, अधिकतम सामग्रियों के संदर्भ में
- डेप्थ प्रोफाइलिंगः सामान्य रूप से नहीं; लेकिन इसे प्राप्त किया जा सकता है
- प्रतिदर्श आवश्यकताएंः कोई भी सामग्री जो 5x5 वर्ग मिमी क्षेत्र से अधिक हो
- विभेदनः सामान्य रूप से एक्सरे डोलनिक वक्र मापन के लिए 12 आर्क सेकंड
- मुख्य उपयोगः क्रिस्टलीय प्रावस्था की पहचान, स्ट्रेन एवं आकार का निर्धारण, क्रिस्टलीय गुणवत्ता एवं एकल क्रिस्टल का अभिविन्यास
- विशेषज्ञीकृत उपयोगः त्रुटि इमेजिंग एवं लक्षणवर्णन, बहु–परतीय संघटन; परत की मोटाई का मापन, व्युत्क्रम आकाशीय मैपिंग, आदि

प्रकाशिकी लक्षणवर्णन

प्रकाशिकी लक्षणवर्णन एक अविनाशी तकनीक है। किसी भी सामग्री की पारगम्यता एवं परावर्तकता प्रकाशिकी स्थिरांकों, नामतः अपवर्तक सूचकांक एवं अवशोषण गुणाँक द्वारा नियंत्रित होती है। इन प्रकाशिकी स्थिराकों की स्पेक्ट्रल निर्भरता अपेक्षित स्पेक्ट्रल परिसर में, फैब्रीकेशन अनुप्रयोगों में सामग्रियों का उपयोग करने के लिए जरूरी है। स्पेक्ट्रोस्कोपिक मापन का उपयोग ऐपीटेक्सीयल पतली फिल्मों की मोटाई प्राप्त करने के लिए भी किया जा सकता है। प्रकाशिकी अध्ययनों को दो यंत्रों, नामतः फोरियर ट्रांसफोर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्रोमीटर (0.5 μm–200 μm) और डिसपर्विव यूवी–विजिबल स्पेक्ट्रोमीटर (0.2 μm से 0.85 μm) का प्रयोग करके 0.2 से 200 μm से किया जाता है। एक उच्च विभेदन परिक्षेपी अर्थात हाइ रिजोल्यूशन डिसपर्सिव स्पेक्ट्रोमीटर का प्रयोग करके सूक्ष्म–रमन मापन किए जाते हैं।

एफटीआईआर, यूवी.दृश्य परिक्षेपी स्पेक्ट्रोमीटर

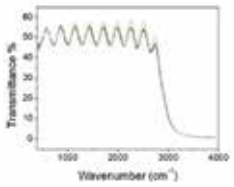
माइकलसन इंटरफेरोमीटर में एक स्थिर दर्पण, एक गतिमान दर्पण तथा एक 60° बीम–स्प्लिटर सन्निहित है। बीम–स्प्लिटर आपतित विकिरण के आधे भाग को स्थिर दर्पण में परिवर्तित करता है तथा अन्य आधे भाग को गतिमान दर्पण में प्रतिबिंबित करता है। इन दर्पणों द्वारा बीमों को बीम–स्प्लिटर में वापस प्रतिबिंबित किया जाता है, जहाँ वे उच्च प्रभाव डालते हैं। जब स्थिर दर्पण एवं गतिमान दर्पण बीम–स्प्लिटर से तुल्यदूरी पर होते हैं, तब सभी तरंग दैर्ध्यों के एम्प्लीटयूड प्रावस्था में होते हैं तथा उनमें संरचनात्मक व्यवधान होते हैं। शून्य पथ भिन्नता की स्थिति वहां होती है, जहाँ इंटरफेरोग्राम केंद्र का विस्फोट होता है। जैसे–जैसे गतिमान दर्पण बीम–स्पिल्टर से दूर जाता है, तब एक प्रकाशीय पाथ भिन्नता सृजित होती है। जैसे–जैसे गतिमान दर्पण की स्थिति बदलती है, तब दो किरण.पुंज एक इंटेरोफेरोग्राम स्थापित करने हेतु पुनःएकत्र होने से पहले इंटेरफेरोमीटर के भीतर भिन्न दूरियों की यात्रा करते हैं। इंटरफेरोग्राम फास्ट फोरियर ट्रांसफार्मेशन का प्रयोग करके स्पेक्ट्रम को प्राप्त करने हेतु विमिश्रित व डिमॉड्यूलेट होते है। एफटीआईआर आईआर. तरंग दैर्ध्य क्षेत्र में बहुत उपयोगी होता है। चित्र 40 एसएसपीएल में एफटीआईआर स्पेक्ट्रोमीटर को दर्शाता है।

दृश्य एवं यूवी क्षेत्रों में प्रकाशीय अध्ययनों हेतु एक ग्रेटिंग आधारित डिसपर्सिव यूवी–विजेबल स्पेक्ट्रोमीटर का प्रयोग किया जाता है। चित्र 41 एसएसपीएल में यूवी–दृश्य स्पेक्ट्रोफोटोमीटर को दर्शाता है। चित्र 42 एफटीआईआर प्रणाली द्वारा एमसीटी एपीटैक्सीय परत के ट्रांसमिशन स्पेक्ट्रम को दर्शाता है। चित्र 43 यूवी–दृश्य स्पेक्ट्रोफोटोमीटर का प्रयोग करके सीजेडटी अवस्तर के पारगम्यता स्पेक्ट्रम को दर्शाता है।

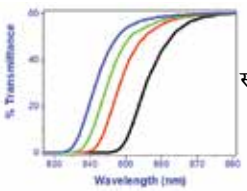
यूवी-दृश्य/एफटीआईआर

चित्र ४०. एफटीआईआर स्पेक्ट्रोमीटर

चित्र ४१. यूवी-दृश्य स्पेक्ट्रो-फोटोमीटर एजिलेंट कैरी-३०



चित्र ४२. एक एमसीटी एपीटैक्सीयल परतों का ट्रांसमिशन स्पेक्ट्रम



चित्र ४३. यूवी-दृश्य स्पेक्ट्रो-फोटोमीटर का प्रयोग करके सीजेडटी अवस्तर का पारगम्यता स्पेक्ट्रा

तकनीकी विशिष्टताएँ, एक नजर में

- सूचना: रासायनिक बांडों की कंपन आवृतियां
- एलिमेंट रेंज: सभी, परंतु एलिमेंट विशिष्ट नहीं
- विनाशकारी: नहीं
- रासायनिक आबंधन: हां, कार्यात्मक समूहों की सूचना की पहचान करना
- डेप्थ प्रोफाइलिंग: नहीं, मानक स्थितियों के तहत नहीं
- अन्वेषण सीमाएं: अनुनवेषित से <1OI3 बांड/सीसी की रेंज में कभी– कभी उप–मोनोलेयर
- मात्रीकीकरण: आमतौर पर मानकों की आवश्यकता होती है
- पुनरुत्पादकता: महीनों के दौरान 0.1% विचलन
- प्रतिदर्श आवश्यकताएं: ठोस, तरल या सभी रूपों में गैस; वैक्यूम की आवश्यकता नहीं
- मुख्य उपयोग: ठोस पदार्थों एवं पतली फिल्मों के लिए रासायनिक प्रजातियों, ट्रेस एवं बल्क दोनों का गुणत्तात्मक एवं मात्रात्मक निर्धारण। दबाव, संरचनात्मक समभाविकता

डीप लेवल ट्रांजिएंट स्पेक्ट्रोस्कोपी

सेमेट्रोल डीप लेवल ट्रांजिएंट स्पेक्ट्रोस्कोपी (डीएलटीएस) एक अर्द्धचालक संरचना का प्रयोग करती है जिसमें एक ऐसा क्षेत्र होता है, जो मोबाइल चार्ज का क्षय करता है और मापन स्थितियां कैरियर्स की ट्रैपिंग हेतु परिवर्तित हो सकती हैं। सबसे अच्छी विधि है डायोड का प्रयोग करना तथा संभावित मौजूद ट्रैपों को भरने हेतु अपरदन क्षेत्र की चौड़ाई को बढ़ाना तथा एक व्युत्क्रम अभिनत का प्रयोग करके अपरदन चौड़ाई को बढ़ाना, और ट्रैप्ड चार्जों के उत्सर्जन की दर का मापन करना। उत्सर्जन दर का मापन किया जाता है क्योंकि यह ट्रैप एनर्जी, कैप्चर क्रास सेक्शन, और संकेंद्रण पर सूचना प्राप्त करने हेतु तापमान के साथ परिवर्तित होती है।

डीएलटीएस प्रणाली के साथ–साथ कीथले 2611बी, 2651ए एसएमयू, एजिलेंट ई4980ए एलसीआर मीटर, और पीएक्सआई वीएनए का प्रयोग करके त्रुटियों पर डीसी दबाव, आरएफ एवं प्रकाशीय उत्तेजन के प्रभाव को भी प्राप्त किया जा सकता है। डीएलटीएस प्रणाली का तापमान विचलन 78K से 750K तक है। चित्र 44 एसएसपीएल में डीएलटीएस प्रणाली को दर्शाता है।

चित्र ४४. डीएलटीएस प्रणाली

निम्न तापमान उच्च चुंबकीय क्षेत्र हाल/ प्रतिरोधकता

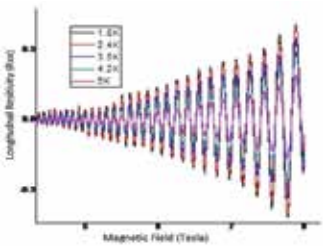
विद्युतीय लक्षणवर्णन का अभिप्राय तापमान एवं चुंबकीय क्षेत्र के कार्य के रूप में; अनेक गुणधर्मों, जैसे कि हाल गुणांक, चालकता का मापन है। इसका प्रयोग महत्वपूर्ण सामग्री प्राचलों, जैसे कि कैरियर टाइप एवं चार्ज कैरियर्स के संकेंद्रण, गतिशीलता को निष्कर्षित करने के लिए किया जा सकता है। चुंबकीय क्षेत्र के कार्य के रूप में चालकता एवं हाल गुणाँक के विचलन का अध्ययन संकीर्ण अंतराल वाले अर्द्धचालकों एवं बहु.परतीय संरचनाओं में मौजूद मल्टीकैरियर के बारे में सूचना प्रदान करता है।

एसएसपीएल में मौजूद प्रणाली 1.6–400 K के तापमान परिसर में हाल/प्रतिरोधकता डेटा का मापन करने में सक्षम है। परिवर्ती तापमान मापन डेटा विश्लेषण की जा रही सामग्री में दाताओं एवं ग्राहियों के ऊर्जा स्तरों के सक्रियकरण के विश्लेषण हेतु उपयोगी है। यह नवोन्नत प्रणाली एक सिंग्ल क्रायो–कूलर का प्रयोग करके प्रतिदर्श एवं चुंबक दोनों को समकालिक नियंत्रित कूलिंग उपलब्ध कराती है। हाल वोल्टेज मापनों को क्रियान्वित करने के लिए, प्रणाली में 8 टेस्ला तक क्रायोजन मुक्त चुंबक (सीएफएम) उपलब्ध है। परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र मापन बहुपरतीय संरचनाओं के लिए और सामग्री में मौजूद मल्टीकैरियर के विश्लेषण के लिए उपयोगी होता है। चुंबक के लिए कूलिंग लगभग 6K के आधार तापमान के साथ एक मानक क्रायो–कूलर के द्वारा उपलब्ध कराई जाती है। परिवर्ती तापमान इन्जर्ट (जिसमें नमूना व प्रतिदर्श रखा गया है) को सीएफएम के रंध्र में निर्मित किया गया है, जो एक सिंग्ल क्रायो–कूलर का प्रयोग करके प्रतिदर्श के लिए परिवर्ती तापमान एवं चुंबकीय क्षेत्र पर्यावरण, दोनों, उपलब्ध कराता है। प्रतिदर्श स्थल को संदूषित किए बिना प्रतिदर्श को परिवर्तित करने हेतु एक एअरलॉक भी उपलब्ध कराया गया है।

चित्र 45 मैग्नेटों के परिवहन के मापन के लिए इलेक्ट्रॉनिक प्रणाली के साथ क्रायो–स्टेट को दर्शाता है। चित्र 46 गैलियम नाइट्राइड–आधारित एचईएमटी संरचना में शुबनिकोव डे–हास (एसडीएच) ओसिलेशन को दर्शाता है।

न्यून तापमान उच्च चुम्बकत्व फील्ड हाल/प्रतिरोधकता

चित्र ४५. मैग्नेटो परिवहन के मापन के लिए इलेक्ट्रॉनिक प्रणाली के साथ क्रायो-स्टेट



चित्र ४६. गैलियम नाइट्राइड-आधारित एचईएमटी संरचना में शुबनिकोव डे-हास ओसिलेशन (SdH)

तकनीकी विशिष्टताएँ, एक नजर में

- मुख्य उपयोगः क्वांटम हाल प्रभाव मापन
- एलिमेंटों की रेंजः न्यून प्रतिरोधी अर्द्धचालक सामग्रियां
- तापमान परिसरः 1.6 K-400K
- चुंबकीय क्षेत्र का परिसरः 0–8 टेस्ला
- प्रतिदर्श आवश्यकताएंः 5 मिमी x 5 मिमी से कम
- सम्पर्क की प्रकृतिः पूर्ण रूप से ओहमिक सम्पर्क
- गुणधर्मों का मापन निम्न प्रकार किया जा सकता हैः
  - सामग्रियों में मौजूद कैरियर्स की प्रकृति
  - त्रुटि विश्लेषण
  - 2डीईजी प्रणाली में कैरियर संकेंद्रण
- विशेषीकृत अनुप्रयोगः क्वांटम हाल प्रभाव एवं स्पिन हाल प्रभाव का अध्ययन

स्कैनिंग प्रोब माइक्रोस्कोप

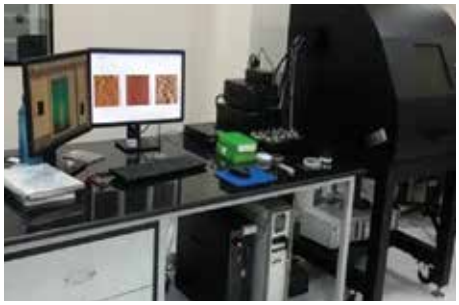
स्कैनिंग प्रोब माइक्रोस्कोपी एक प्रोब–आधारित इमेजिंग तकनीक है जिसके द्वारा प्रतिदर्शों व नमूनों की पृष्ठ विशेषताओं का अन्वेषण माइक्रॉन से आणविक स्तर तक किया जाता है। एसपीएम तकनीकों में, एक शार्प प्रोब टिप प्रतिदर्श के पृष्ठ से अभिक्रिया करती है तथा संपूर्ण प्रतिदर्श पृष्ठ को स्कैन करती है। टिप और प्रतिदर्श के परस्पर अन्योन्यक्रियाओं की खोज अन्योन्यक्रिया बल, घर्षण, चार्ज, चालकता, आदि के कार्य के रूप में की जाती है। भिन्न तकनीकें भिन्न अन्योन्यक्रियाओं का बोध कर लेती हैं, जिनका उपयोग पृष्ठ स्थलाकृति, अन्योन्यक्रिया बल, विद्युतस्थैतिक चार्ज, चालकता, आदि का वर्णन करने हेतु किया जाता है।

एसपीएम प्रणाली के संभावित मोड्स निम्न प्रकार हैं:

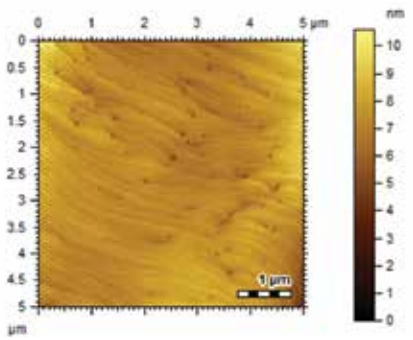
- आणविक बल सूक्ष्मदर्शी (एएफएम)
- स्कैनिंग टनलिंग सूक्ष्मदर्शी (एसटीएम)
- सरफेस स्प्रैडिंग रेसिस्टेंस माइक्रोस्कोपी (एसएसआरएम)
- पीजो बल सूक्ष्मदर्शी (पीएफएम)
- केल्विन बल सूक्ष्मदर्शी (केएफएम)

एएफएम एसपीएम प्रणाली की सर्वाधिक उपयोग की गई विधा है। प्रतिदर्श की टिप एवं पृष्ठ के परस्पर अंतर–आणविक बल पृष्ठ स्थलाकृति के लिए जिम्मेदार हैं। प्रोब के छोटे आकार का प्रयोग उच्च विभेदन अर्थात हाइ रिजोल्यूशन के लिए किया जाता है। मुख्य अनुप्रयोगों में, पृष्ठ इमेजिंग, पृष्ठ रुक्षता का निर्धारण, लाइन प्रोफाइलिंग, ग्रेन/नैनो डॉट आकारों का निर्धारण, पीजो–आधारित सामग्रियों के लिए पीजो गुणाँक, इलेक्ट्रिकल मोड्स सरफेस संभाव्यता का प्रयोग, स्टैट्स की लोकल डेंसिटी, अर्द्धचालक नमूनों के लिए प्रतिरोधकता की मैपिंग, आदि शामिल हैं। यह तकनीक सामान्यतया अविनाशी है। चित्र 47 एसपीएम प्रणाली को दर्शाता है तथा चित्र 48 सिलिकॉन कार्बाइड अवस्तर पर गैलियम नाइट्राइड लेयर के क्षेत्र 5 μm x 5 μm की द्विविमीय एएफएम इमेज को दर्शाता है।

एसपीएम



चित्र ४७. एसपीएम प्रणाली



चित्र ४८. गैलियम नाइट्राइड परत का एएफएम इमेज

तकनीकी विशिष्टताएँ, एक नजर में

- मुख्य उपयोग: उच्च विभेदन प्रोब–आधारित इमेजिंग
- आवर्धन परिसर: 1000000 X
- मोड: कॉन्टेक्ट, स्थलाकृति के लिए टैपिंग, विद्युतीय मोड्स
- प्रतिदर्श आवश्यकता: कोई भी पतली फिल्म/बल्क फ्लैट प्रतिदर्श
- प्रतिदर्श आकार: 1 सेमी से कम, 100 सेमी या उससे अधिक तक
- पार्श्विक विभेदन: x-y में 0.1 nm
- अनुलंब विभेदन: z में 0.05 nm
- मुख्य उपयोग: पृष्ठ इमेजिंग, पृष्ठ रुक्षता का निर्धारण, लाइन प्रोफाइलिंग, ग्रेन/नैनो डॉट आकार का निर्धारण, विद्युतीय मोड्स पृष्ठ संभाव्यता का प्रयोग, स्ट्रैट्स की लोकल डेंसिटी, अर्द्धचालक प्रतिदर्शों के लिए प्रतिरोधकता की मैपिंग, पीजो–आधारित सामग्रियों के लिए पीजो–गुणांक

ट्रांसमिशन इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोप

ट्रांसमिशन इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (टीईएम)–आधारित तकनीकें इंटरफेसियल विवरणों, यंत्र संरचनाओं के परिमाप व विमाएं, और त्रुटियों या दोषों (जो फैब्रीकेशन प्रक्रम के दौरान उत्पन्न होते हैं) के मूल्यांकन के लिए काफी सुसंगत हैं। इसके अलावा, अर्द्धचालक यंत्रों की विशिष्टताएं बड़ी तेजी से घटकर उप–नैनोमीटर आकार की हो गई हैं, इसलिए टीईएम सामग्री लक्षणवर्णन में अपने श्रेष्ठकर आकाशीय विभेदन एवं संवेदनशील तात्विक विश्लेषण सक्षमताओं के कारण प्रक्रम की निगरानी एवं विफलता विश्लेषण के लिए एक आवश्यक तकनीक बन गई है।

टीईएम सामग्रियों के संरचनात्मक एवं इलेक्ट्रॉनिक गुणधर्मों तथा उनकी संवृद्धि स्थितियों के बीच संबंध का अध्ययन करने का साधन है। टीईएम का उपयोग विस्थापनों की इमेजिंग, दाना आकार, नैनो कण आकार, क्रिस्टेलाइट के आकार, और सामग्री में आणविक व्यवस्था के मापन के लिए किया जा सकता है।

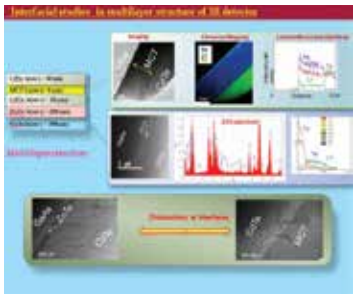
आणविक विमाओं में कार्य करने हेतु वैश्लेषिक क्षमताओं का विस्तार करने के लिए, एक टीईएम प्रयोगशाला को हाल ही में एसएसपीएल में स्थापित किया गया है।

टीईएम प्रयोगशाला के अंतर्गत दो खंड नामतः (क) हाइ रिजोल्यूशन ट्रांसमिशन इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोप (एचआरटीईएम), और (ख) टीईएम प्रतिदर्श विरचन प्रयोगशाला सन्निहित हैं।

चित्र 49 में (क) टीईएम प्रणाली/तंत्र, (ख) एसएसपीएल में प्रतिदर्श तैयारी यंत्र को दर्शाता है, और चित्र 50 CdTe/ एमसीटी परतों का टीईएम तथा ईडीएस परिणाम दर्शाता है।

टीईएम

चित्र ४९. (क) टीईएम प्रणाली (ख) प्रतिदर्श तैयारी यंत्र



चित्र ५०. CdTe/ एमसीटी परतों का टीईएम तथा ईडीएस परिणाम

तकनीकी विशिष्टताएँ, एक नजर में

- मुख्य उपयोगः हाइ रिजोल्यूशन इलेक्ट्रॉन बीम ट्रांसमिशन इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोप
- आवर्धन परिसरः 1000K
- मोड्सः टीईएम/एसटीईएम इमेजिंग, ईडीएस, इलेक्ट्रान विवर्तन, 3डी टोमोग्राफी
- प्रतिदर्श आवश्यकताः पाउडर, पतली फिल्म/बल्क सपाट प्रतिदर्श, समतल दृश्य एवं अनुप्रस्थ काट प्रतिदर्श विरचन।
- प्रतिदर्श आकारः प्रतिदर्श तैयारी के लिए ~ 1 सेमी, 100 सेमी तक
- रिजोल्यूशनः 0.16 नैनोमी
- मुख्य उपयोगः ट्रांसमिशन मोड में उच्च विभेदन इमेजिंग, त्रुटि/विस्थापन घनत्व का निर्धारण, इंटरफेस का विश्लेषण, दाना आकार का मापन, नैनो कण आकार, क्रिस्टेलाइट का आकार, और सामग्री में आणविक व्यवस्था का मापन

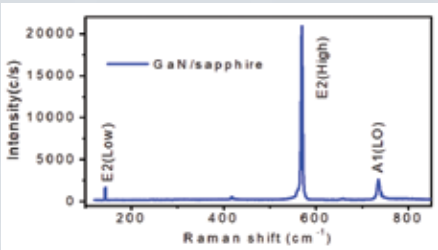
रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी

रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी एक अविनाशी लक्षणवर्णन तकनीक है, जो सामग्रियों (अर्थात अणु, कंपाउंड, अर्द्धचालक, आदि) के बारे में परिपूर्ण सूचना रमन (फोनॉन) मोड्स के माध्यम से उपलब्ध कराती है। रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी सामग्री का लक्षणवर्णन उनके आणविक संघटन, आबंधों, रासायनिक पर्यावरण, प्रावस्था, दबाव/प्रजाति एवं क्रिस्टल अभिविन्यास, कैरियर सांद्रता आदि के लिए करती है।

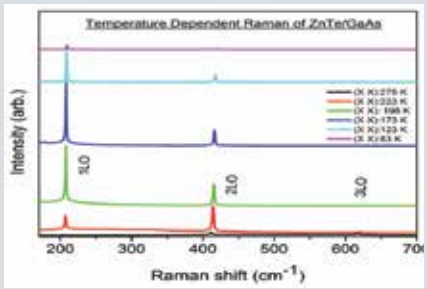
रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी का प्रयोग आसान संक्रिया के कारण तथा न्यूनतम प्रतिदर्श विरचन के कारण बड़े पैमाने पर किया जाता है। प्रत्यास्थता की दृष्टि से अस्तव्यस्त रैले लाइन कोई सूचना उपलब्ध नहीं कराती है, जबकि अप्रत्यास्थ रूप से अस्तव्यस्त एंटी–स्टोक्स लाइनें सामान्य रूप से तीव्रता में कमजोर रहती हैं। स्टोक्स रमन लाइनें आमतौर पर रैले लाइट के प्रतिबल की फिल्टरिंग के द्वारा रिकॉर्ड की जाती हैं जिसके लिए उपयुक्त लॉन्ग पास एज फिल्टरों का प्रयोग किया जाता है। फोटोलुमिनेसेंस स्पेक्ट्रा को रिकॉर्ड करने के लिए स्पेक्ट्रोमापी का भी प्रयोग किया जाता है।

चित्र में 51 एसएसपीएल में रमन स्पेक्ट्रोफोटोमीटर को दर्शाया गया है। चित्र 52 में गैलियम नाइट्राइड एपीटैक्सीय परत के रमन स्पेक्ट्रा को दर्शाया गया है। चित्र 53 में परिवर्ती तापमान द्वारा जिंक टेल्युराईड/गैलियम आर्सेनाइड प्रतिदर्श के रमन स्पेक्ट्रा को दर्शाया गया है।

रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी



चित्र ५२. गैलियम नाइट्राइड एपीटैक्सीयल लेयर का रमन स्पेक्ट्रा



चित्र ५३. परिवर्ती तापमान द्वारा जिंक टेल्युराईड/गैलियम आर्सेनाइड एपीटैक्सीय लेयर का रमन स्पेक्ट्रा

तकनीकी विशिष्टताएँ, एक नजर में

- सूचना: रासायनिक बंधों की कंपन आवृत्तियां
- तत्व परिसर: सभी, लेकिन तत्व विशिष्ट नहीं
- विनाशक: नहीं, लेकिन लेजर प्रतिदर्श को क्षतिग्रस्त कर सकती है
- रासायनिक बांडिंग: हां, कार्यात्मक समूहों की पहचान
- डेप्थ प्रोफाइलिंग: कुछ माइक्रॉन्स में डेप्थ रिजोल्यूशन
- पुनरुत्पानीयता: महीनों के दौरान 0.1% विचलन
- पार्श्विक विभेदन: 2 माइक्रॉन
- इमेजिंग/मैपिंग: हां
- प्रतिदर्श आवश्यकताएं: ठोस, तरल, या सभी रूपों में गैस; वैक्यूम की आवश्यकता नहीं
- मुख्य उपयोग: ठोस पदार्थों एवं पतली फिल्मों के लिए रासायनिक प्रजातियों, ट्रेस एवं बल्क दोनों का गुणत्तात्मक एवं मात्रात्मक निर्धारण। दबाव, संरचनात्मक समभाविकता, वाहक संकेन्द्रण

चित्र ५१. रमन स्पेक्ट्रोमापी