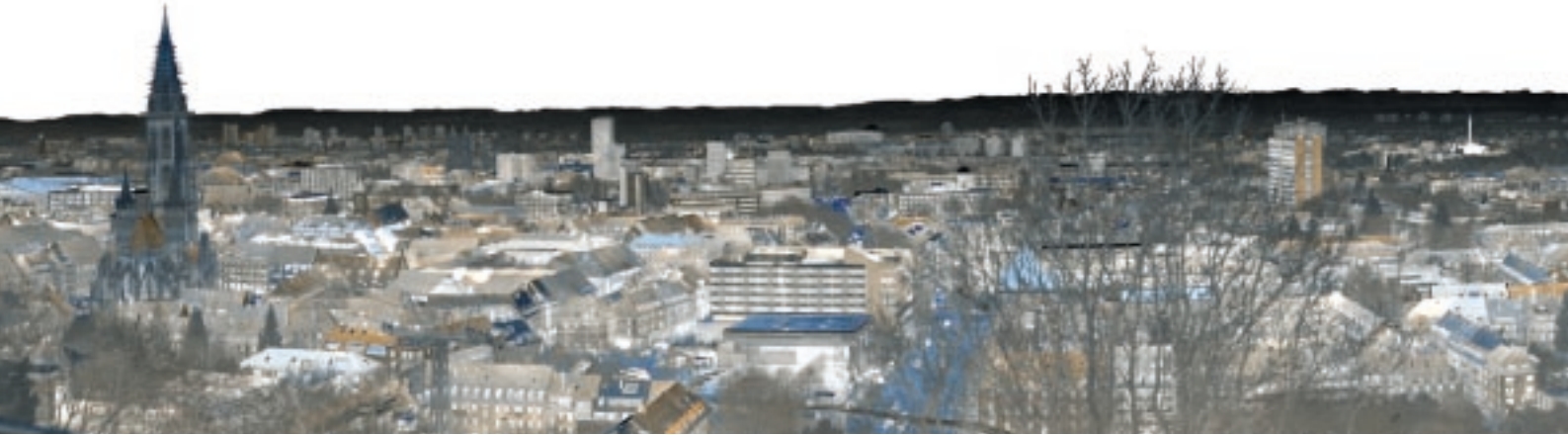


# Infrared Sensors Infrarot-Sensoren



»A camera, seeing colors at night« - a headline in the *Badische Zeitung* dated March 2, 2007 beneath the panorama of Freiburg, taken in the middle of a dark night. The development of this camera sensing colors in the infrared was awarded the Landesforschungspreis 2006 of the Land of Baden-Württemberg. Our congratulations go to the prize winners Martin Walther, Robert Rehm, Joachim Fleissner, and Johannes Schmitz. This is our second Landesforschungspreis Baden-Württemberg, in 2002 it was for the development of »Diode Lasers of High Brilliance«.

*»Eine Kamera, die nachts farbig sieht« - so schrieb die Badische Zeitung am 2. März 2007 unter das Panoramabild Freiburgs, aufgenommen in dunkler Nacht. Die Entwicklung dieser Kamera für Farbbilder im Infraroten wurde mit dem Landesforschungspreis 2006 des Landes Baden-Württemberg ausgezeichnet. Das Fraunhofer IAF freut sich mit den Preisträgern Martin Walther, Robert Rehm, Joachim Fleissner und Johannes Schmitz. Es ist unser zweiter Landesforschungspreis Baden-Württemberg, 2002 wurden unsere höchstbrillanten Diodenlaser ausgezeichnet.*



Infrared sensors for wavelengths from 3 – 20  $\mu\text{m}$  are in the focus of our IR-technology. Quantum well infrared photodetectors (QWIP) based on intersubband transitions in superlattices show record thermal and spatial resolution. For the next detector generation with even higher sensitivity we develop short period superlattices. High efficiency dual-band IR detectors will use MCT structures.

Infrarot-Sensoren für den Spektralbereich von 3 – 20  $\mu\text{m}$  stehen im Mittelpunkt unserer IR-Technologie. Diese Quantenfilm-Infrarot-Photodetektoren (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP) nutzen Intersubbandübergänge in (AlGa)As-Halbleiterübergittern aus. InAs/GaSb-Übergitter werden für die nächste Detektorgeneration mit noch höherer Empfindlichkeit entwickelt. Für Zwei-Band-IR-Detektoren mit hoher Quanteneffizienz werden HgCdTe-Strukturen verwendet.



Robert Rehm  
Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-3 53  
robert.rehm@iaf.fraunhofer.de

The evolution of infrared (IR) imaging systems, which commenced around 1960, has gone a long way. The first generation of IR imagers consisted of one-dimensional detector arrays, relying on optical scanners to project the scene onto a linear strip of individually contacted pixels. By the late 1970's, the development of the second generation IR imagers was started. These systems are based on two-dimensional, staring focal plane array (FPA) detectors, which are hybridized to a readout integrated circuit (ROIC). Driven by the demand for higher spatial resolution («megapixel cameras»), more on-chip functionality and the capability to simultaneously image different wavelength regions, the third generation of IR imaging system is currently under development.

Most attention is now devoted to bi-spectral IR cameras operating either as »dual color« systems in the mid-wavelength infrared (MWIR, 3 – 5  $\mu\text{m}$ ) or the long-wavelength infrared (LWIR, 8 – 12  $\mu\text{m}$ ), or as »dual-band« devices in both spectral bands (MWIR and LWIR, see Fig. 1). In contrast to conventional mono-spectral IR cameras, bi-spectral IR imagers not only allow to quantify the overall signal intensity, but also provide information on the spectral distribution of the incident radiation (Fig. 2). This facilitates the discrimination between an object's temperature and its emissivity and represents an enormous advantage, comparable to the transition from monochrome to colored imaging in the visible spectral range.

Today,  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (CMT) detectors, quantum well infrared photodetectors (QWIPs), and InAs/GaSb superlattices are considered to be the three major technologies for the realization of third generation infrared cameras.

Each approach offers pros and cons, the technology of choice depends on the specific application. At our Institute, we are working on all three leading detection technologies for the realization of third generation IR imaging systems.

After several years of steady progress, GaAs-based QWIP technology has now reached a substantial degree of maturity. The main inherent restriction of QWIPs, i. e., their limited quantum



Fig. 1: Fused complementary color image, taken with the 288x384 dual-band QWIP camera. Complementary colors blue and orange have been used to superimpose the MWIR and LWIR channel, respectively, in one image.  
Abb. 1: Aufnahme mit einer 288x384-Zwei-Band-QWIP-Kamera, wobei die Daten des MWIR- und LWIR-Kanals in den Komplementärfarben blau bzw. orange überlagert in einem Bild dargestellt wurden.

Die Entwicklung bildgebender Infrarot (IR)-Sensorik begann um das Jahr 1960. Wärmebildgeräte der ersten Generation beruhten auf einer eindimensionalen Zeile einzeln kontaktierter Detektorelemente, auf welche die Szene mittels eines optischen Scanners projiziert wurde. Geräte der zweiten Generation, deren Entwicklung in den späten 1970er Jahren angegangen wurde, basieren auf zweidimensionalen, starrenden Bildfeldmatrizen (FPAs), welche mit einem Ausleseschaltkreis (ROIC) hybridisiert werden. Aufgrund der steigenden Nachfrage nach höherer räumlicher Auflösung (»Megapixel-Kameras«), größerer Funktionalität und der Fähigkeit zur zeitgleichen Detektion in getrennten Spektralbereichen, befindet sich gegenwärtig eine dritte Generation von Wärmebildgeräten in der Entwicklung.

Das meiste Interesse gilt hier bi-spektralen IR-Kameras, welche entweder als »Zwei-Farben«-Kamera im mittleren IR (MWIR, 3 – 5  $\mu\text{m}$ ) oder im langwelligen IR (LWIR, 8 – 12  $\mu\text{m}$ ) arbeiten, oder als »Zwei-Band«-Gerät in beiden Spektralbändern (MWIR und LWIR, Abb. 1) sensitiv sind. Im Gegensatz zu herkömmlichen, mono-spektralen IR-Kameras erlauben bi-spektrale Geräte nicht nur die Messung der Gesamtintensität, sondern liefern Informationen über die spektrale Verteilung der einfallenden Strahlung (Abb. 2). Auf diese Weise kann zwischen der Temperatur und Emissivität eines Objekts unterschieden werden. Dies stellt einen enormen Vorteil dar, der mit dem Übergang von der Schwarz-Weiß- zur Farbfotografie im Sichtbaren verglichen werden kann.

Gegenwärtig stellen  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (CMT)-Detektoren, Quantenfilm-Infrarotdetektoren (QWIPs) und InAs/GaSb-Übergitter die drei wichtigsten Technologien zur Realisierung von Wärmebildkameras der dritten Generation dar. Da jeder Ansatz sowohl Vor- als auch Nachteile aufweist, hängt die Technologie der Wahl von den konkreten Anwendungsanforderungen ab. Unser Institut arbeitet daher parallel an allen drei führenden Technologien.

Nach Jahren konstanten Fortschritts hat die GaAs-basierende QWIP-Technologie einen beträchtlichen Reifegrad erreicht. Der QWIP-inhären-

rente Hauptnachteil eines limitierten Quantenwirkungsgrads wird durch viele Vorteile, wie z. B. einer ausgezeichneten thermischen und räumlichen Auflösung, geringem »Fixed-Pattern«- und  $1/f$ -Rauschen, einer Pixel-Operabilität nahe 100 % und sehr wettbewerbsfähigen Kosten ausgeglichen. Weiterhin reduziert die intrinsisch schmalbandige Absorptions-Charakteristik das optische Übersprechen in bi-spektralen QWIP-Kameras.

In Zusammenarbeit mit AIM Infrarot-Module GmbH (Heilbronn) wurde eine Zwei-Band-QWIP-Kamera mit einer räumlichen Auflösung von  $288 \times 384$  Pixeln im  $40 \mu\text{m}$ -Rastermaß entwickelt. Die Kamera integriert pixel- und zeitgleich zwei getrennte Spektralkanäle mit  $4,8 \mu\text{m}$  bzw.  $8,0 \mu\text{m}$  Zentralwellenlänge und bietet eine exzellente thermische Auflösung (NETD) von  $26,7 \text{ mK}$  für das MWIR und  $20,6 \text{ mK}$  für das LWIR. Abb. 1 zeigt eine Szene in Erlangen, welche mit einer Zwei-Band-QWIP-Kamera aufgenommen wurde. Die Daten beider Bänder können in Echtzeit zusammengeführt werden, wodurch Charakteristika der Szene besser erkannt werden können und der gesamte Bildeindruck wesentlich verbessert wird. Die Zwei-Band-QWIP-Kamera wird von IRCAM GmbH, Erlangen, kommerziell vertrieben.

In vielerlei Hinsicht stellen InAs/GaSb-Übergitter, die jüngste Technologie für Wärmebildgeräte der dritten Generation, das III/V-Pendant zu CMT dar.

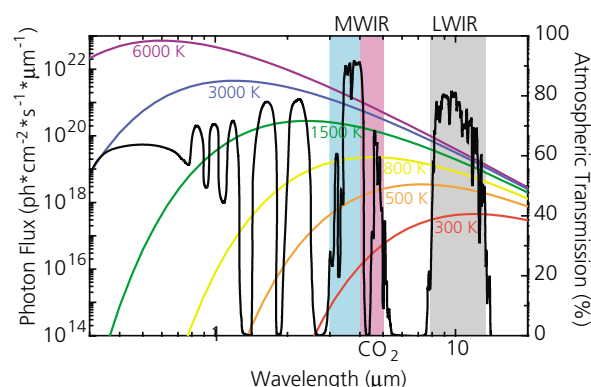


Fig. 2: Photon flux emitted by a black body at different temperatures according to Planck's law and atmospheric transmission (black curve) for a distance of 1850 m at sea level. Abb. 2: Photonenfluß eines Schwarzkörperstrahlers nach dem Planck'schen Gesetz und atmosphärische Transmission (schwarze Kurve) auf einer Wegstrecke von 1850 m in Meereshöhe.

efficiency, is balanced by many advantages, e. g., excellent thermal and spatial resolution, low fixed-pattern noise, low  $1/f$ -noise, pixel operability close to 100 %, and competitive costs. In addition, the intrinsic narrow-band absorption characteristic reduces the optical cross-talk in bi-spectral QWIP imagers.

In collaboration with AIM Infrarot-Module GmbH, Heilbronn, we have developed dual-band QWIP cameras with a spatial resolution of 288x384 pixels at 40  $\mu\text{m}$  pitch. The camera features a pixel-registered, simultaneous integration of two well separated spectral channels centered around 4.8  $\mu\text{m}$  and 8.0  $\mu\text{m}$ . An excellent thermal resolution or noise equivalent temperature difference (NETD) of 26.7 mK for the MWIR and 20.6 mK for the LWIR channel has been measured. Fig. 1 shows an image of a scene in Erlangen, taken with our dual-band QWIP camera. Data fusion from both bands can be performed in real time facilitating the discrimination between different features in the scene and greatly improving the overall image impression. This dual-band QWIP camera is commercialized by IRCAM GmbH, Erlangen.

In many respects, the latest third generation technology, namely InAs/GaSb superlattices (SLs), can be considered the III/V counterpart to CMT. While quantum efficiencies achievable with both technologies are roughly equal, InAs/GaSb SLs are more competitive in costs due to a higher process yield and commercially available large-area, lattice-matched substrates. Although theoretical assessments suggest that antimony-based SLs might outperform CMT at longer wavelengths, this remains to be confirmed yet.

The very first InAs/GaSb SL MWIR camera with 256x256 pixels and 40  $\mu\text{m}$  pitch was demonstrated by our Institute in 2004. In 2006, an improved version with 288x384 pixels and a pitch of 24  $\mu\text{m}$  followed. With  $F\#/2.4$ -optics, a NETD of 14 mK has been determined for an integration time of 4 ms. The system shows background

limited performance up to 92 K. The reduction of the pixel size is an important milestone towards a future superlattice camera with mega-pixel spatial resolution. Additionally, doubling of the number of SL periods in the active layer led to a responsivity, which increased by roughly the same factor of two (Fig. 3). Together with AIM, we fabricated the worldwide first third-generation imaging system based on InAs/GaSb SLs. The 288x384 dual-color MWIR camera offers two simultaneously integrated, pixel-registered spectral channels between 3 – 4  $\mu\text{m}$  (»blue channel«) and 4 – 5  $\mu\text{m}$  (»red channel«). NETD values of 22.2 mK and 11.7 mK for the blue and red channel have been achieved with 2.8 ms integration time and  $F\#/2$ -optics.

The dual-color MWIR detector is ideally suited for remote detection of carbon dioxide due to the strong  $\text{CO}_2$  line around 4.3  $\mu\text{m}$ . Since no  $\text{CO}_2$  emission occurs in the blue channel, subtracting the blue from the red channel clearly reveals the  $\text{CO}_2$  signature of the scene. The extremely sensitive system even detects  $\text{CO}_2$  in the breath of a person (Fig. 4). The ability to detect hot carbon dioxide makes the dual-color MWIR detector ideally suited for missile approach warners. It will therefore be a key component of the missile warning system MIRAS (Multi-Color Infrared Alerting Sensor) developed by EADS and Thales for the European military transport aircraft Airbus A400M.

Although technologically challenging,  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  is traditionally known for its state-of-the-art performance with low dark currents and high quantum efficiencies. This allows the fabrication of MWIR/LWIR dual-band cameras with very high frame rates. In order to elaborate the complex growth of large-area dual-band CMT layers, we started a program on CdHgTe molecular beam epitaxy in 2004. While Fraunhofer IAF is focused on epitaxy and materials characterization, AIM is engaged in device processing and fabrication of dual-band FPA cameras.

Während sich mit beiden Technologien vergleichbare Quanteneffizienzen erzielen lassen, sind InAs/GaSb-Übergitter kostengünstiger herzustellen dank einer höheren Prozessausbeute und der kommerziellen Verfügbarkeit großer, gitterangepaßter Substrate. Die gegenüber CMT theoretisch erwartete bessere Leistungsfähigkeit im längerwelligen Bereich bleibt nachzuweisen.

Im Jahr 2004 demonstrierte unser Institut die erste Übergitterkamera mit 256x256 Bildpunkten im 40  $\mu\text{m}$ -Rastermaß. 2006 folgte eine verbesserte Version mit 288x384 Bildpunkten auf einem 24  $\mu\text{m}$  Raster. Mit F#/2,4-Optik wurde mit 4 ms Integrationszeit eine NETD von 14 mK gemessen. Das System arbeitet hintergrundlimitiert bis 92 K. Das verkleinerte Rastermaß stellt einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zu künftigen Kameras mit Megapixelauflösung dar. Zusätzlich wurde die Zahl aktiver Perioden verdoppelt, was zu einem Anstieg der Responsivität um etwa den gleichen Faktor führte (Abb. 3).

Gemeinsam mit AIM wurde die weltweit erste InAs/GaSb-Übergitter-Kamera der dritten Generation realisiert. Die 288x384-Zwei-Farben-Kamera ermöglicht die zeit- und ortsgleiche Erfassung zweier Spektralkanäle zwischen 3 – 4  $\mu\text{m}$  (»blauer Kanal«) und 4 – 5  $\mu\text{m}$  (»roter Kanal«). Mit F#/2-Optik und 2,8 ms Integrationszeit konnten NETD-Werte von 22,2 mK und 11,7 mK für den blauen bzw. roten Kanal erreicht werden.

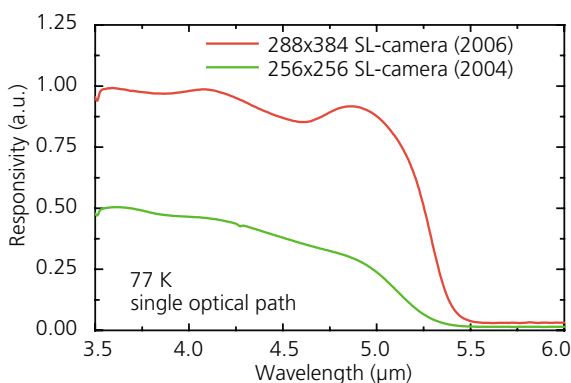


Fig. 3: Comparison of two mono-spectral SL cameras for the MWIR realized in 2004 and 2006. The response is increased by doubling the number of SL periods.  
Abb. 3: Vergleich der Responsivität zweier monospektraler Übergitter-Kameras für das MWIR, welche 2004 bzw. 2006 hergestellt wurden. Die Responsivität wurde durch Verdopplung der Zahl von Übergitterperioden gesteigert.

Der Zwei-Farben-MWIR-Detektor erlaubt die Ferndetektion von Kohlendioxid aufgrund der starken  $\text{CO}_2$ -Linie bei 4,3  $\mu\text{m}$ . Da im Spektralbereich des blauen Kanals keine  $\text{CO}_2$ -Emission auftritt, können in der Szene präsente  $\text{CO}_2$ -Signaturen durch Differenzbildung des roten und blauen Kanals sichtbar gemacht werden. Das hoch empfindliche System erlaubt selbst das in der Atemluft enthaltene  $\text{CO}_2$  darzustellen (Abb. 4). Aufgrund der Fähigkeit, heißes  $\text{CO}_2$  zu detektieren, eignet sich der Zwei-Farben-MWIR-Detektor in hervorragender Art und Weise als Raketenwarnsensor. Diese Technologie wird als Schlüsselkomponente des Raketenwarnsystems MIRAS (Multi-Color Infrared Alerting Sensor) eingesetzt, welches von EADS und Thales für das europäische Transportflugzeug Airbus A400M entwickelt wird.

Einerseits technologisch sehr schwierig, bietet CMT jedoch auch einen geringen Dunkelstrom und hohen Quantenwirkungsgrad. Dies erlaubt, MWIR/LWIR-Zwei-Band-Kameras mit hohen Bildwiederholraten herzustellen. Zur Untersuchung des komplexen Wachstums großflächiger Zwei-Band-CMT-Schichten wurde 2004 ein Programm zur Molekularstrahlepitaxie von CMT begonnen. Das Fraunhofer IAF konzentriert sich dabei auf die Epitaxie und Materialcharakterisierung. AIM prozessiert die Schichten zu Bauelementen und fertigt Zwei-Band-FPA-Kameras.



Fig. 4:  $\text{CO}_2$  contained in the breath of a person is visualized in the subtraction image of the MWIR 288x384 dual-color superlattice camera (red channel minus blue channel).  
Abb. 4: Das in der Atemluft enthaltene  $\text{CO}_2$  kann im Differenzbild (roter Kanal minus blauer Kanal) einer 288x384-Zwei-Farben-Übergitter-Kamera dargestellt werden.



# X-ray Diffractometric Analysis of Crystal Defects in SiC Substrates and AlGaN/GaN HEMT Layers

Lutz Kirste  
Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-3 30  
lutz.kirste@iaf.fraunhofer.de



High-electron mobility transistors (HEMTs) based on AlGaN/GaN layers are now well established as high-power electronic devices due to enormous improvements in materials quality and device fabrication technology. However, there are still a lot of open questions, closely related to the crystallographic properties of the materials.

Epitaxial growth of the AlGaN/GaN structures is a most crucial step for the realization of reliable HEMTs. Common substrates for the fabrication of AlGaN/GaN HEMT structures are sapphire and SiC. Sapphire is available at significantly lower costs than SiC, but suffers from low heat conductivity and large lattice mismatch of -16.1 %. For this reason, SiC with a lattice mismatch of -3.4 % and an excellent thermal conductivity of 3.5 W/(cm K), which is an order of magnitude higher than that of sapphire, is currently the substrate of choice for the fabrication of nitride-based HEMTs for power applications.

Commercially available 4H and 6H SiC wafers contain many structural defects such as dislocations, hollow core screw dislocations («micro-pipes»), small angle grain boundaries, stacking faults or inclusions. The impact of these defects on the morphological properties of GaN-based HEMTs grown on SiC substrates has not been fully analyzed and understood.

At Fraunhofer IAF, we use different techniques based on X-ray diffraction for the structural characterization of the AlGaN/GaN layers on SiC substrates. X-ray diffraction is a powerful tool providing fast, non-destructive, reliable, and accurate access to many of structural parameters.

For the analysis of structural imperfections of the SiC substrates, we apply X-ray diffraction topography (XRT). The purpose of XRT is the visualization and characterization of crystal defects, i. e. determination of type, geometry, density, scale, and distribution of various defects in the crystal. In general, it is not the crystal defect itself, but the extensive lattice deformation of the crystal that changes the diffracted X-ray beam intensity and becomes visible as a contrast in a topography.

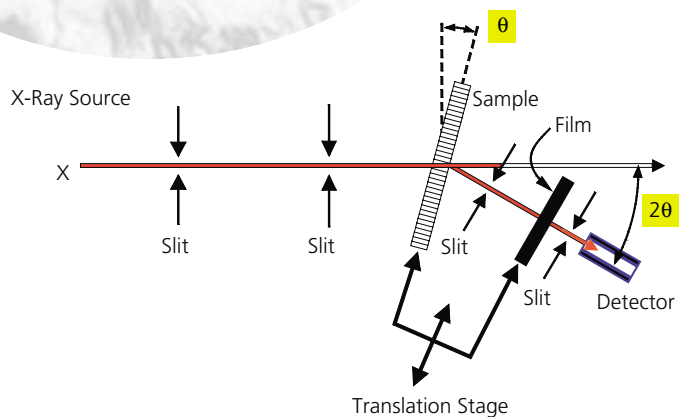


Fig. 1: Scheme of X-ray topography camera («Lang camera») for defect imaging in transmission geometry.  
Abb. 1: Schema der Röntgentopographie-Kamera (Transmissionsgeometrie).

# Röntgendiffraktometrische Analyse von Kristalldefekten in SiC-Substraten und AlGaN/GaN-HEMT-Schichten

Heterostruktur-Feldeffekttransistoren (HEMTs), basierend auf AlGaN/GaN-Schichten, konnten sich aufgrund enormer Verbesserungen in der Materialqualität und der Prozesstechnik für Leistungsanwendungen gut etablieren, dennoch bleiben viele Fragen zu den kristallographischen Eigenschaften des Materials ungeklärt.

Für die Realisierung von zuverlässigen HEMTs ist das epitaktische Wachstum ein entscheidender Schritt. Die gebräuchlichen Substrate für die Herstellung von AlGaN/GaN-HEMT-Strukturen sind Saphir und SiC. Saphir ist zu signifikant geringeren Kosten erhältlich, besitzt aber eine geringe Wärmeleitfähigkeit und eine große Gitterfehlpassung von -16,1 %. Aus diesem Grund ist SiC mit einer Gitterfehlpassung von -3,4 % und einer exzellenten Wärmeleitfähigkeit von 3,5 W/(cm K), eine Größenordnung höher als bei Saphir, gegenwärtig das Substrat der Wahl für die Herstellung Nitrid-basierender HEMTs für Leistungsanwendungen.

Kommerziell erhältliche 4H- und 6H-SiC-Wafer enthalten zahlreiche Strukturdefekte wie Versetzungen, Hohlkernschraubenversetzungen (»Micropipes«), Kleinwinkelkorngrenzen, Stapelfehler oder Einschlüsse. Die Auswirkungen dieser Defekte auf die morphologischen Eigenschaften von GaN-basierenden HEMTs auf SiC-Substraten ist noch nicht vollständig analysiert und verstanden.

Am Fraunhofer IAF verwenden wir unterschiedliche Techniken, basierend auf der Röntgendiffraktometrie, für die strukturelle Charakterisierung der AlGaN/GaN-Schichten auf SiC. Die Röntgendiffraktometrie ist ein leistungsfähiges Verfahren, zerstörungsfrei, zuverlässig und genau.

Zur Analyse von Kristalldefekten in den SiC-Substraten verwenden wir Röntgentopographie (XRT). Das Ziel bei der XRT ist die Sichtbarmachung und Charakterisierung von Kristalldefekten, z. B. des Typs, der Geometrie, der Dichte, der Größe und der Verteilung der verschiedenen Defekte im Kristall. Im Allgemeinen ist es nicht der Kristalldefekt selbst, sondern die weitgehende Gitterdeformation, die für eine Änderung der Intensität des gebeugten

Röntgenstrahls sorgt und als Kontrast auf einer Topographie sichtbar wird.

Abb. 1 zeigt ein Schema der Röntgentopographie-Kamera, einer sogenannten »Lang-Kamera«. Um Kristalldefekte in einem Röntgenbeugungsbild zu analysieren, wird der Kristall relativ zu einem durch schmale Blenden kollimierten primären Röntgenstrahl orientiert, sodass eine einzelne Schar von Kristallebenen die »Braggsche Bedingung« für die Diffraktion erfüllen. Durch eine synchrone Translation des Kristalls und des Films durch den Röntgenstrahl während der Aufnahme bei konstantem Beugungswinkel wird der Kristall abgebildet. Diese Technik kann in Transmissions- und in Reflexionsgeometrie verwendet werden. Um Defekte im Volumen der SiC-Substrate sichtbar zu machen, verwenden wir eine symmetrische Transmissionsgeometrie mit  $\text{MoK}\alpha_1$ -Strahlung. Reflexionstopographien mit  $\text{CuK}\alpha_1$ -Strahlung werden verwendet, um Defekte in den Nitridschichten und den nahen Oberflächen der SiC-Substrate sichtbar zu machen.

Die strukturelle Qualität der SiC-Substrate kann von Wafer zu Wafer dramatisch variieren. Als ein Beispiel zeigen die Abb. 2a – c stark deformierte Bereiche am Rand und im mittleren Bereich eines 2"-SiC-Substrats. Dies wird offensichtlich anhand der dunklen Stellen in der Transmissionstopographie der Abb. 2a (»kinematischer Kontrast«) und dem Rückgang von Intensität an den gleichen Stellen in der Reflexionstopographie der Abb. 2b (»Orientierungskontrast«). Wie bei der Kontrasttheorie erwartet, zeigen Bereiche besserer struktureller Qualität helle Intensität in Abb. 2a und dunkle Intensität in Abb. 2b. Der Vergleich von XRT-Reflexionstopographien, aufgenommen mit dem SiC- und dem GaN-Reflex, offenbart eine genaue Übereinstimmung der Defektbilder in Abb. 2b – c. Die Defektstruktur des SiC-Substrats und der Nitrid-Schicht stehen in enger Beziehung.

Ein Bereich mit Micropipes (A1 in Abb. 2a) wird vergrößert in Abb. 3 gezeigt. Starke Deformationen um den Kern der Micropipes bewirken, dass diese Bereiche außerhalb des Beugungsbereiches liegen und folglich zu weißen Punkten



Fig. 1 shows a scheme of the X-ray topography camera, the so-called »Lang camera«. To analyze crystal defects in an X-ray diffraction image, the crystal is oriented with respect to a narrow slit-collimated primary X-ray beam, such that a single set of crystal planes satisfies the »Bragg condition« for diffraction. The complete crystal is imaged by translating the crystal and the film synchronously through the X-ray beam during the exposure with a constant diffraction angle. This technique can be used in transmission and back reflection geometry. To show up defects within the SiC substrates, we use a symmetrical transmission geometry with  $\text{MoK}\alpha_1$  radiation. Back reflection topographs with  $\text{CuK}\alpha_1$  radiation are used to visualize defects in the nitride film and the upper surface of the SiC substrates.

The structural quality of the SiC substrates can vary dramatically from wafer to wafer. As an example, Fig. 2a – c show heavily distorted regions at the periphery and in the center part of a 2-inch SiC substrate. This is evident from the dark spots in the transmission topograph of Fig. 2a (»kinematical contrast«) occurring at the same sites where a loss of intensity is observed in the reflection topograph of Fig. 2b (»orientation contrast«). As expected from contrast theory, regions of better structural quality show up bright in Fig. 2a and dark in Fig. 2b. Comparison of the XRT back reflection images taken with the SiC and the GaN reflection reveals a close match of the defect images in these figures (Fig. 2b – c). The defect structures of the SiC substrate and nitride film are thus closely related.

A region with micropipes (A1 in Fig. 2a) is shown on an enlarged scale in Fig. 3. Strong deformations near the core of the micropipes cause these regions to be outside the diffraction range, thus leading to white spots on the topographs, as seen in Fig. 3b. The overall contrast caused by defects is lower for the back reflection image of the nitride film compared to the SiC substrate due to the broader half-width of the film reflection. Therefore, the GaN back reflection peak is less susceptible to indicate small orientation changes.

We can assume that our films exhibit the usual mosaicity tilts and dislocation density common in heteroepitaxial grown nitride films due to the large lattice mismatch between the epitaxial layer and the substrate. The main reason why most of these defects (e. g. dislocations) are not displayed in the topographic images, is the small film thickness when compared with the extinction depth for the X-ray reflection used. For AlGaIn/GaN/4H SiC-based HEMT circuits it is often difficult to decide if a device failure originates from structural defects of the SiC substrate, grown-in defects of the film or process induced flaws.

The X-ray topographic imaging of processed wafers suffers from the absorption caused by the metallization layers on the surface. Nevertheless, X-ray topographs showing spatially resolved information about the crystal quality on a micrometer scale can be used to locate defects in a crystalline material even in metallized regions.

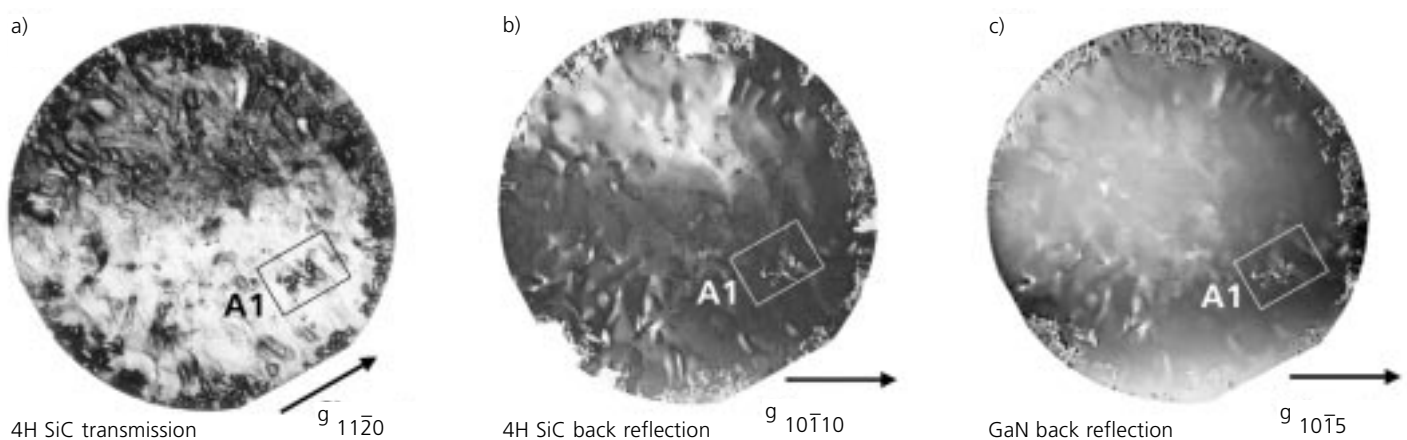


Fig. 2: X-ray diffraction topography images for a 4H SiC substrate and HEMT layers deposited on the substrate.  
 Abb. 2: Röntgentopogramme eines 4H-SiC-Substrats und einer darauf abgeschiedenen HEMT-Schicht.

auf den Topographien führen (Abb. 3b). Der durch die Defekte erzeugte Gesamtkontrast ist bei der Reflexionstopographie der Nitridschicht aufgrund der größeren Halbwertsbreite des Schichtreflexes geringer als bei der Topographie des SiC-Substrats. Aus diesem Grund ist der GaN-Reflex weniger empfindlich, um kleine Orientierungsänderungen anzuzeigen.

Wir können davon ausgehen, dass unsere Schichten die üblichen Mosaizitätsverkipnungen und Versetzungsdichten heteroepitaktisch gewachsener Nitridschichten aufweisen, die aufgrund der großen Gitterfehlpassung zwischen der Epitaxieschicht und dem Substrat entstehen. Der Hauptgrund dafür, dass die meisten dieser Defekte (z. B. Versetzungen) nicht in den Topographien abgebildet werden, ist die geringe Schichtdicke im Vergleich zur Extinktionstiefe des verwendeten Röntgenreflexes.

Bei AlGaN/GaN/4H-SiC-basierenden HEMT-Schaltungen ist es häufig schwierig zu entscheiden, ob ein Fehler durch Defekte des SiC-Substrats, eingewachsene Defekte der Schicht oder prozessinduzierte Fehler verursacht wird. Das röntgentopographische Abbilden von prozessierten Wafern wird durch die Absorption der Metallisierungsschichten auf der Oberfläche erschwert. Dennoch können Röntgentopographien, die orts aufgelöste Informationen über die Kristallqualität auf einer Mikrometerskala zeigen, zur Lokalisierung von Kristalldefekten in nicht-metallisierten und sogar in metallisierten Regionen genutzt werden.

Die beiden vergrößerten Transmissionstopographien der Abb. 4a und 4b zeigen Korngrenzen und Micropipes (P) im SiC-Substrat in der Nähe einer AlGaN/GaN-HEMT-Schaltung. Die starken lokalen Deformationen des Kristallgitters lassen uns vermuten, dass die Funktion des Bauelements in den Abb. 4a und 4b voraussichtlich durch die strukturellen Defekte beeinträchtigt wird. Zum Vergleich zeigt Abb. 4c eine Topographie mit gut aufgelösten Micropipes eines nicht-metallisierten Bereichs. Micropipes sind verantwortlich für erhöhte Leckströme und reduzierte Durchbruchspannungen und einer der Hauptgründe für Bauelementausfälle.

Zusätzlich zu der hier gezeigten Röntgentopographie werden verschiedene Varianten der hochauflösenden Röntgendiffraktometrie (HRXRD) verwendet, um weitere detaillierte Strukturinformationen wie Verspannung, AlGaN-Zusammensetzung, Schichtdicken, Grenzflächenrauigkeit und Mosaizität (Kristallitgröße und Verkipfung) zu gewinnen.

Abb. 5 zeigt eine HRXRD-Messung und die Simulation einer AlGaN/GaN/AlN-Schichtstruktur auf 4H-SiC (0001). Das Profil wurde senkrecht zur Probenoberfläche ( $\gg\Theta/2\Theta$ -scan $\llcorner$ ) im Bereich des GaN-0002-Reflexes aufgenommen. Aus den Abständen der Interferenzen wurde die Dicke der AlGaN-Barriere ermittelt. Die Bestimmung der Verspannung und der Zusammensetzung der ternären Schicht ist hier kompliziert, da gleichzeitig vollständig verspannte, teilrelaxierte und vollständig relaxierte Schichten analysiert werden

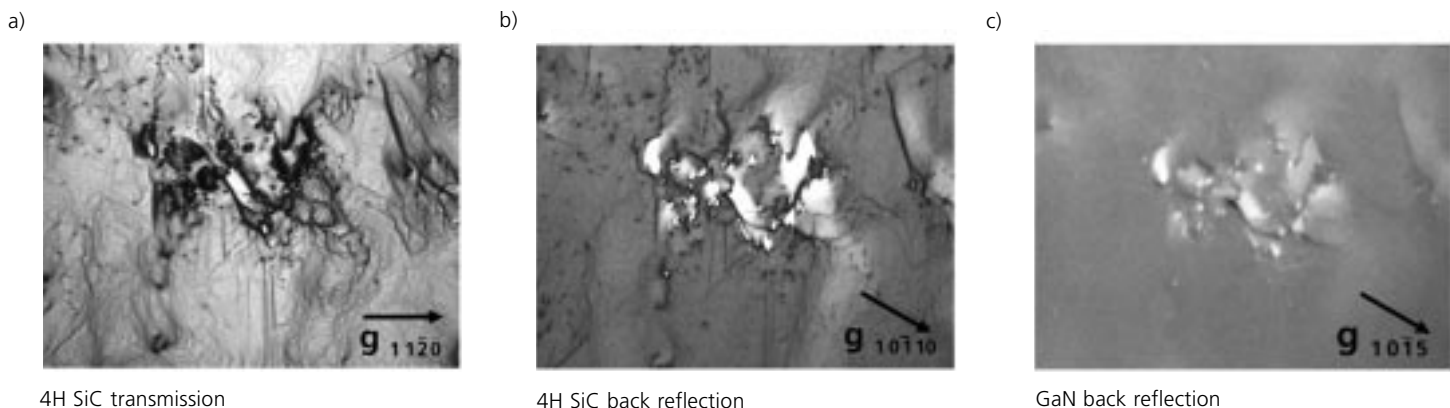


Fig. 3: Enlarged area A1 of Fig. 2: X-ray topographic images showing defects in SiC wafer (a, b) and in HEMT layers (c). Close match of the defect images clearly shows that defect structures of substrate and nitride film are related.

Abb. 3: Vergrößerter Ausschnitt A1 der Abb. 2: Röntgentopogramme, die Defekte im SiC-Wafer (a, b) und in den HEMT-Schichten zeigen (c). Die Übereinstimmungen zeigen, dass die Defektstrukturen des Substrats und der Nitridschicht miteinander verknüpft sind.

The two enlarged transmission X-ray topographs of Fig. 4a and 4b show grain boundaries and micropipes (P) in the SiC substrates in the vicinity of the AlGaN/GaN HEMT-based circuits. Strong local deformations of the crystal lattice let us assume, that the performance of the devices shown in Fig. 4a and 4b is likely to be affected by structural defects. For comparison, a topograph with well resolved micropipes from a non-metallized region on the same wafer is shown in Fig. 4c. Micropipes are responsible for increased leakage currents and a reduction of the breakdown voltage and are one of the main reasons for device failures in AlGaN/GaN HEMTs.

In addition to the X-ray diffraction topography presented here, different variants of high-resolution X-ray diffractometry (HRXRD) are used to extract more detailed structural information like strain, AlGaN composition, layer thicknesses, interface roughness and mosaicity (average size of crystallites, tilt).

Fig. 5 shows an HRXRD measurement and a simulation pattern of an AlGaN/GaN/AlN layer sequence on 4H SiC (0001). The scan was taken perpendicular to the sample's surface (« $\Theta/2\Theta$ -scan») in the GaN 0002 reflection range. From the spacing of the interference fringes the thickness of the AlGaN barrier layer is deduced. The determination of the strain and the composition of the ternary layer is complex in this material system because we have to deal with fully strained, partially relaxed, and fully relaxed layers at the same time. One method to determine the

lattice parameters for calculating strain and composition is to measure so-called »reciprocal space maps« (RSM) from a set of defined symmetrical and asymmetrical reflections. A RSM is a two-dimensional diffraction pattern taken from a number of scans with slightly different angular offsets. An RSM of an asymmetric reflection range directly gives an idea about the strain in the various layers. Only if the reflections of two layers, or a layer and the substrate, are sequenced on a perpendicular line, the upper layer is fully strained to the lower one. Fig. 6 shows an RSM 10-15 reflection range of the same AlGaN/GaN/AlN layer on 4H SiC (0001) as in Fig. 5. The AlN starting layer is grown partly relaxed and the GaN layer is grown nearly fully relaxed in relation to the SiC substrate, but the thin AlGaN barrier layer is fully strained to the GaN layer.

To meet the increasing demand on HRXRD for the characterization of AlGaN/GaN HEMTs, a new high-resolution X-ray diffractometry system was installed in September 2006. The X'Pert PRO MRD system from PANalytical is able to handle substrates up to 4-inch diameter and allows to change to different optical setups within minutes.

The development of high-quality semiconductor devices based on III-nitrides relies on the knowledge of crystallographic properties. Our experts in the X-ray diffraction laboratory are committed to supply those structural data quickly, reliably, and as accurately as possible.

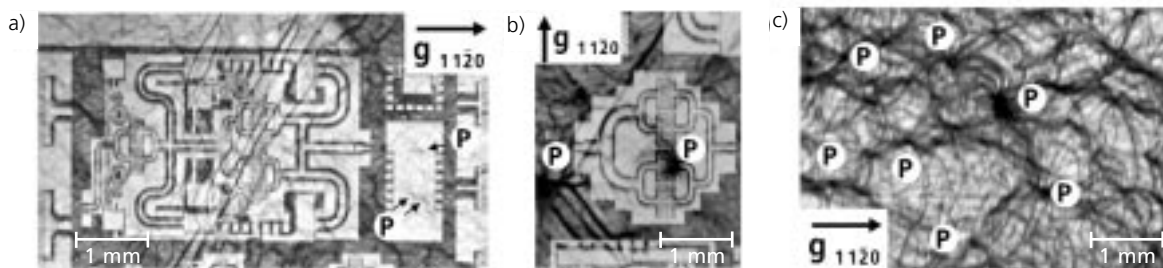


Fig. 4: X-ray diffraction transmission topographs of two AlGaN/GaN HEMT circuits on 4H SiC imaged through metallization (Fig. 4a, b). Both topographs show dislocation bundles in SiC substrate (dark lines crossing below the device metallization) and contrasts due to micropipes (P) outcropping at surface. For comparison a topograph with well resolved micropipes from a metallization free part of same wafer is shown in Fig. 4c.

Abb. 4: Röntgentransmissionstopogramme zweier AlGaN/GaN-HEMT-Schaltungen auf 4H-SiC, aufgenommen durch die Metallisierung (Abb. 4a, b). Beide Topogramme zeigen Versetzungsanhäufungen im SiC-Substrat und Kontraste von Micropipes (P), die an der Oberfläche zutage treten. Abb. 4c zeigt zum Vergleich gut aufgelöste Micropipes eines metallfreien Bereichs des gleichen Wafers.

müssen. Ein Verfahren zur Bestimmung der Gitterparameter, um Verspannung und Zusammensetzung berechnen zu können, ist das Messen sogenannter »Reziproker Gitterkarten« (RSM) eines definierten Satzes symmetrischer und asymmetrischer Reflexe. Bei einer RSM handelt es sich um ein zweidimensionales Beugungsdiagramm, aufgenommen aus einer Reihe von Einzelmessungen mit geringen unterschiedlichen Achsversätzen. Eine RSM eines asymmetrischen Reflexbereichs gibt direkt den relativen Verspannungszustand der verschiedenen Einzelschichten. Nur wenn sich die Reflexe zweier Schichten, oder einer Schicht und des Substrats, auf einer senkrechten Linie aufreihen, ist die obere Schicht vollständig zu der darunter liegenden verspannt. Abb. 6 zeigt einen RSM 10-15-Reflexbereich derselben AlGaN/GaN/AlN-Schicht auf 4H-SiC (0001) wie auf Abb. 5. Die AlN-Anfangsschicht ist teilrelaxiert und die GaN-Schicht nahezu vollständig relaxiert relativ zum SiC-Substrat, dagegen ist die dünne AlGaN-Barriere vollständig auf der GaN-Schicht verspannt.

Um den zunehmenden Anforderungen an die HRXRD von AlGaN/GaN-HEMTs gerecht zu werden, wurde im September 2006 ein neues hochauflösendes Röntgendiffraktometer in Betrieb genommen. Das X'Pert PRO MRD-System von PANalytical ermöglicht das Messen von Substraten bis 4 Zoll und erlaubt den Wechsel zu verschiedenen optischen Konfigurationen innerhalb weniger Minuten.

Die Entwicklung von hochwertigen III-Nitrid-basierenden Bauelementen beruht auf der Kenntnis der kristallographischen Eigenschaften. Unsere Spezialisten im Röntgenlabor stellen diese Strukturdaten möglichst schnell, zuverlässig und genau bereit.

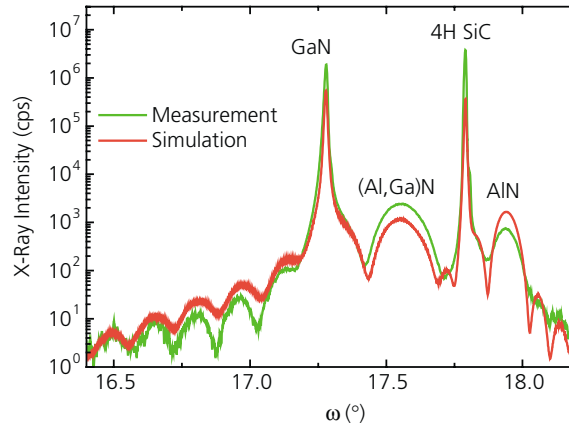


Fig. 5: X-ray diffraction profile of AlGaN/GaN/AlN layer structure on 4H SiC (0001). Simulations yield a thickness of  $28.8 \pm 0.5$  nm for the AlGaN barrier layer (red profile).  
Abb. 5: Röntgendiffraktogramm einer AlGaN/GaN/AlN-Schicht-Struktur auf 4H-SiC (0001). Die Simulation ergab eine Dicke von  $28,8 \pm 0,5$  nm für die AlGaN-Barriere (rotes Profil).

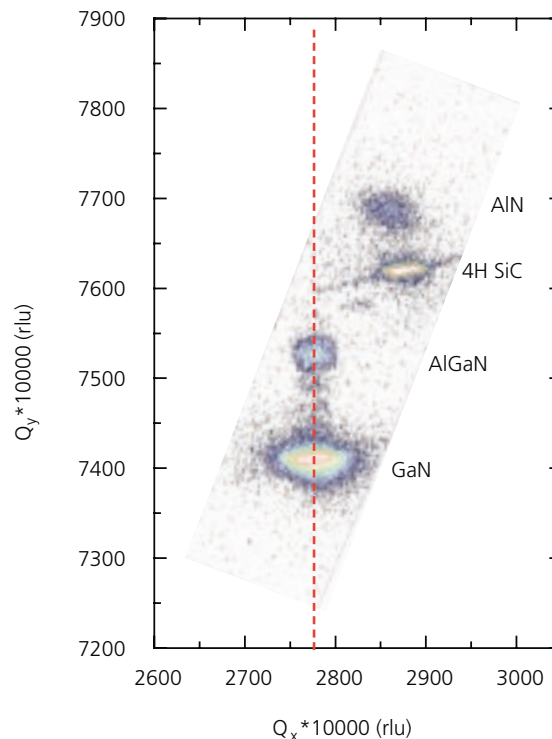


Fig. 6: Reciprocal space map of an AlGaN/GaN/AlN layer sequence on 4H SiC (0001) in the 10-15 reflection range. Distribution of layer reflections shows relaxation of the AlN starting layer and the GaN layer in relation to SiC substrate, while the thin AlGaN barrier layer is fully strained to GaN layer.  
Abb. 6: RSM des 10-15-Reflexes einer AlGaN/GaN/AlN-Schicht-Struktur auf 4H-SiC (0001). Die Verteilung der Schichtreflexe zeigt, dass die AlN-Anfangsschicht und die GaN-Schicht relativ zum SiC-Substrat relaxiert sind, dagegen ist die dünne AlGaN-Barriere vollständig verspannt.