

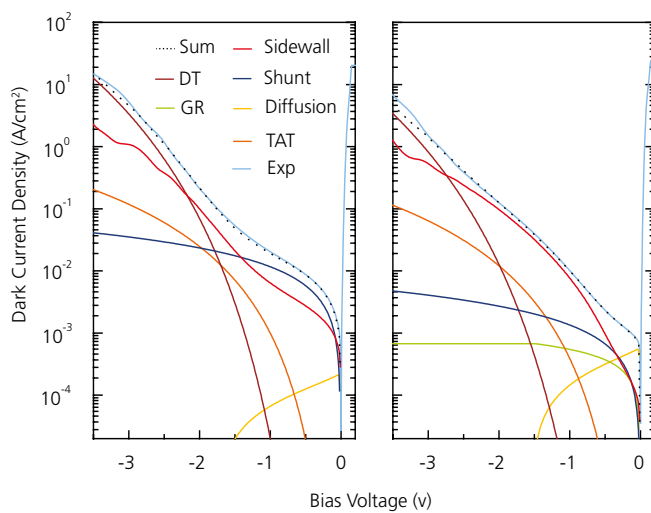
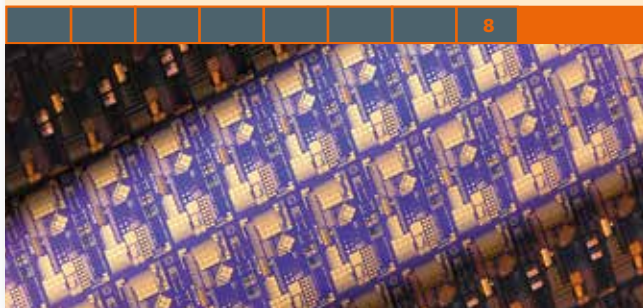
LIMITING MECHANISMS IN InAs/GaSb SUPERLATTICE INFRARED PHOTODIODES

ROBERT REHM
 TEL. +49 761 5159-353
 ROBERT.REHM@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – InAs/GaSb PHOTODIODES

- WAVE LENGTH REGION: 8 – 12 μm
- DIFFUSION-LIMITED BEHAVIOUR
- GENERATION-RECOMBINATION-LIFETIME
 AT 77 K: UP TO 230 ns
- BACKGROUND DOPING: 10^{15} cm^{-3}

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 Dark current analysis of two LWIR InAs/GaSb superlattice homo-junction photodiodes at 77 K grown on MBE #1 (left) and MBE #2 (right). MBE #1: $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $R_{shunt}A = 85 \Omega\text{cm}^2$, $\tau_n = 25.0 \text{ ns}$, $\tau_{GR} = n.a.$; MBE #2: $N_a = 9.4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $R_{shunt}A = 734 \Omega\text{cm}^2$, $\tau_n = 5.5 \text{ ns}$, $\tau_{GR} = 229.6$.

Dunkelstromanalyse zweier LWIR-InAs/GaSb-Übergitterdioden bei 77 K mit Homoübergang, gewachsen auf MBE #1 (links) und MBE #2 (rechts). MBE #1: $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $R_{shunt}A = 85 \Omega\text{cm}^2$, $\tau_n = 25,0 \text{ ns}$, $\tau_{GR} = n.a.$; MBE #2: $N_a = 9,4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $R_{shunt}A = 734 \Omega\text{cm}^2$, $\tau_n = 5,5 \text{ ns}$, $\tau_{GR} = 229,6$.

The growth of InAs/GaSb superlattice infrared detector technology into a major competitor of established materials like CdHgTe and InSb is continuing. Getting ahead requires improvement of the electrooptical performance of the bulk material. To optimize the growth process and to fine tune the device concepts, an in-depth understanding of limiting physical mechanisms in InAs/GaSb superlattice devices is essential. Fraunhofer IAF has established a characterization technique that allows to accurately determine various mechanisms contributing to the dark current and thus to the noise in the detectors.

Within the last decade, Fraunhofer IAF has advanced its type-II InAs/GaSb superlattice (T2SL) infrared (IR) detector technology from lab demonstration to first commercial applications. In particular, the dual-color focal plane array (FPA) detectors with bi-spectral sensitivity in the mid-wavelength IR atmospheric window (MWIR, 3 – 5 μm) are at the forefront of missile-warning sensors for airborne platforms today. Fraunhofer IAF also develops T2SLs for the long-wavelength regime (LWIR, 8 – 12 μm). A first-class crystal quality of the bulk is the basis of competitive IR-FPAs. In-depth understanding of limiting physical mechanisms and a detailed assessment of parameter modifications during molecular beam epitaxial growth is vital to continuously improve the electrooptical performance of the bulk material.

Most important for a precise evaluation is the accurate fitting of sophisticated dark current models to experimental data. The dark current density J_D of T2SL mesa devices is generally comprised of two components, i. e., the bulk and the sidewall contributions. In the literature, the sidewall component has so far been neglected in dark current analysis. This may lead to misconceptions about limiting contributions. Therefore, the first step in the analysis is to determine the sidewall current per unit length by measuring a large number of mesa devices with variable perimeter-to-area ratio P/A. Provided that the density of macroscopic defects is reasonably low and the sidewall behavior is uniform, J_D will cluster at the accumulation point of every particular size class of mesa detectors. The

LIMITIERENDE MECHANISMEN IN InAs/GaSb-ÜBERGITTER-INFRAROT-PHOTODIODEN

Die Entwicklung von Infrarot-Detektoren auf Basis von InAs/GaSb-Übergittern als Hauptkonkurrent zu etablierten Materialien wie CdHgTe oder InSb setzt sich fort. Um einen Vorsprung herauszuarbeiten ist die konstante Verbesserung der elektrooptischen Eigenschaften des Volumenmaterials erforderlich. Der Schlüssel zur Optimierung des Wachstumsprozesses und Feinabstimmung des Bauelementkonzepts liegt im detaillierten Verständnis der limitierenden physikalischen Mechanismen in InAs/GaSb-Übergittern. Das Fraunhofer IAF hat eine Charakterisierungsmethode etabliert, die es erlaubt, verschiedene Mechanismen präzise zu bestimmen, die zum Dunkelstrom und damit zum Rauschen in diesen Detektoren beitragen. Die Befunde weichen von in der Literatur vorherrschenden Erklärungsansätzen ab.

Im vergangenen Jahrzehnt wurde am Fraunhofer IAF die Infrarot (IR)-Detektortechnologie auf Basis von Typ-II InAs/GaSb-Übergittern (T2SL) vom Stadium der Labordemonstration hin zu ersten kommerziellen Anwendungen vorangetrieben. Insbesondere Dual-Color-Detektor-matrizen (FPAs) mit bi-spektraler Empfindlichkeit im atmosphärischen Transmissionsfenster des mittleren Infrarot (MWIR, 3 – 5 μm) sind heute bereits führend im Bereich der Raketen-Warnsensorik für Flugzeuge. Um den hohen Stand der Technik von CdHgTe zu übertreffen, entwickelt das Fraunhofer IAF auch T2SL-basierte Alternativen für das langwellige Regime (LWIR, 8 – 12 μm). Eine hervorragende Volumenkristallqualität ist die Grundlage für wettbewerbsfähige T2SL-IR-FPAs. Ein tiefes Verständnis der limitierenden physikalischen Mechanismen und eine detaillierte Bewertung von Parametermodifikationen während der Molekularstrahlepitaxie ist entscheidend für die kontinuierliche Verbesserung der elektrooptischen Leistungsfähigkeit des Volumenmaterials.

Wichtig für eine präzise Bewertung ist die Anpassung hochentwickelter Dunkelstrommodelle an experimentelle Messdaten von Mesa-geätzten T2SL-Photodioden. Die Dunkelstromdichte J_D eines T2SL-Mesabaelements setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, dem Volumen- und dem Seitenwandanteil. In der Literatur wurde der Seitenwandanteil für die Analyse von Dunkelströmen bislang vernachlässigt. Dies kann zu Fehleinschätzungen der limitierenden Strombeiträge führen. Daher besteht der erste Schritt der Analyse in der Bestimmung des Seitenwandstroms pro Einheitslänge, indem eine große Zahl von Mesas mit variiertem Umfang-zu-Flächen-Verhältnis P/A gemessen wird. Wenn die Dichte makroskopischer Defekte klein und das Seitenwandverhalten homogen ist, zeigt die Verteilung der J_D -Werte für jede Größenklasse von Mesas einen Häufungspunkt. Trägt man diese Häufungspunkte gegen P/A auf, kann der Seitenwandstrom pro Einheitslänge aus der Geradensteigung bestimmt werden.

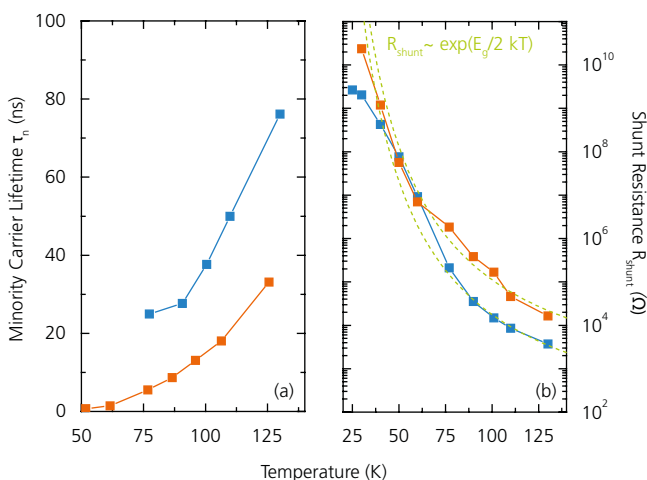
Sobald der Seitenwandstrom extrahiert wurde, kann der Volumenbeitrag durch Subtraktion des Seitenwandanteils von den gemessenen Daten bestimmt werden. Die Volumendunkelstromdichte setzt sich aus fünf Einzelbeiträgen zusammen. Die fundamentale Diffusionskomponente besteht vorwiegend aus thermisch generierten Minoritätselektronen aus der dicken, p-dotierten

sidewall current per unit length can now be determined from the slope of a plot of these accumulation points versus P/A .

Once the sidewall current has been determined, the bulk contribution is accessible by subtracting the sidewall current from the measured data. Five mechanisms jointly generate the bulk dark current density. The fundamental diffusion component is mainly comprised of thermally generated minority electrons from the thick p-type absorber region of the diode, since a very low vertical hole mobility and high donor doping result in a negligible minority hole contribution from the thin n-side. The magnitude of the diffusion current is largely determined by the minority carrier lifetime τ_n and the acceptor doping N_a , i. e. the background doping. The diffusion model takes into account the finite width of the neutral regions in relation to the minority carrier diffusion length. Consequently, the diffusion current decreases with increasing reverse bias. The generation-recombination (GR) current occurs via trap states in the space charge region (SCR) and is generally assumed to be the limiting mechanism in T2SL devices. The magnitude of

the GR current is affected by the corresponding trap level that is assumed at half the band gap, the width w of the SCR and the minority carrier lifetime τ_{GR} in the SCR. Since w is strongly affected, it is necessary to quantify N_a before fitting the GR component in the low reverse bias regime. By taking account of the series resistance of the device, N_a can be obtained from the direct band-to-band tunneling (DT) component at high reverse bias. The second tunneling component, i. e. trap-assisted tunneling (TAT), is of relevance at medium reverse bias and allows determination of the corresponding trap density. The fifth bulk mechanism, that is generally assumed to be caused by defects like threading dislocations is the ohmic shunt component.

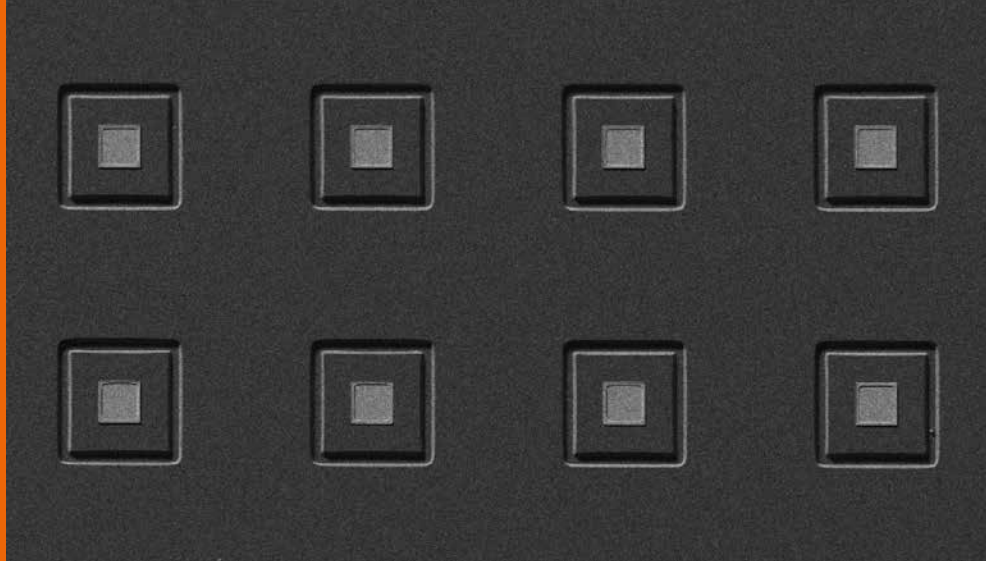
Fig. 1 shows the dark current analysis at 77 K of two LWIR-T2SL homojunction photodiode wafers grown on different MBE machines. The light blue line represents the experimentally measured dark current density and the black dotted line is the sum of the various fitted components. The models can be fitted to the experimental data over a wide bias range. Obviously, the sidewall contribution constitutes a major part of the total dark current. The bulk material from MBE #1 is limited by the shunt mechanism. No GR current is required to explain the experimental data. In contrast, the bulk material from MBE #2 shows an order of magnitude higher shunt resistance and is limited by a low diffusion lifetime instead. On both systems, GR-limited behavior around 77 K cannot be observed. Fig. 2 compares τ_n and the shunt resistance versus temperature for both systems. A first empirical analysis suggests that the shunt resistance scales with the band gap and the temperature in the same way as the GR component. This might be the underlying reason why concepts that have proven successful for GR reduction are also helpful to reduce shunt contributions.



2 Comparison of the minority carrier lifetime and the shunt resistance extracted for MBE #1 (blue) and MBE #2 (orange).

Vergleich der Minoritätsladungsträger-Lebensdauer und des Shunt-Widerstands von MBE #1 (blau) und MBE #2 (orange).

In conclusion, a detailed analysis will eventually lead to optimized, low dark current T2SL IR-FPAs enabling higher operating temperatures and the use of optics with larger f-numbers.



3

3 Scanning electron microscope image of test diodes for dark current characterization.

Rasterlektronenmikroskop-Aufnahme von Testdioden zur Dunkelstromcharakterisierung.

Absorberregion der Diode, da die geringe vertikale Mobilität der Löcher und die hohe Donatorkonzentration zu einem vernachlässigbaren Beitrag der Minoritätslöcher von der n-Seite führen. Die Höhe des Diffusionsstroms ist hauptsächlich bestimmt durch die Minoritätsladungsträger-Lebensdauer τ_n und die Akzeptordotierung N_a , welche in unseren Teststrukturen der Hintergrunddotierung entspricht. Das verwendete Diffusionsmodell berücksichtigt die in Relation zur Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger endliche Länge der neutralen Bahngebiete. Entsprechend nimmt der Diffusionsstrom mit zunehmender Rückwärtsspannung ab. Der Generations-Rekombinationsstrom (GR) nutzt Störstellen in der Raumladungszone (SCR) und wird allgemein als der limitierende Mechanismus in T2SL-Dioden erachtet. Die Höhe des GR-Stroms wird durch die Lage der zugehörigen Störstelle bestimmt, welche in der Mitte der Bandlücke anzunehmen ist. Weiterhin bestimmen die Breite w der SCR und die Minoritätsladungsträgerlebensdauer τ_{GR} in der SCR den GR-Strom. Da die geringe Hintergrunddotierung w beeinflusst, ist es erforderlich, zunächst N_a zu bestimmen, bevor die GR-Komponente durch Modellanpassung bei kleiner Rückwärtsspannung extrahiert werden kann. Berücksichtigt man den Serienwiderstand des Bauelements, kann N_a aus dem direkten Band-zu-Band-Tunneln bei hoher Rückwärtsspannung gewonnen werden. Die zweite Tunnelkomponente, das Störstellen-assistierte Tunneln, ist wichtig bei mittlerer Rückwärtsspannung und erlaubt die Bestimmung der zugehörige Störstellendichte. Eine ohmsche Shunt-Komponente stellt den fünften Mechanismus dar, welcher im Volumen von T2SL-Photodioden auftreten kann. Allgemein wird angenommen, dass durchstoßende Versetzungen und andere Defekte hierfür ursächlich sind.

Abb. 1 zeigt die Dunkelstromanalyse zweier LWIR-T2SL-Wafer mit Homoübergang bei 77 K, die auf unterschiedlichen MBE-Anlagen gewachsen wurden. Die hellblauen Linien zeigen die gemessenen Dunkelstromdichten und die schwarz gepunkteten Linien stellen die Summe der fünf angepassten Teilbeiträge dar. Die Modelle lassen sich über einen breiten Spannungsbereich an die experimentellen Daten anpassen. Offenbar stellt der Seitenwandanteil einen Hauptbeitrag zum Gesamtdunkelstrom dar. Das Volumenmaterial von MBE #1 ist durch den Shunt-Mechanismus limitiert. Zur Erklärung der experimentellen Daten ist kein GR-Anteil erforderlich. Dagegen zeigt das Volumenmaterial von MBE #2 einen um eine Größenordnung höheren Shunt-Widerstand und ist stattdessen durch eine geringe Diffusionslebensdauer limitiert. Für beide Anlagen wird um 77 K keine GR-Limitierung beobachtet. Abb. 2 vergleicht die Temperaturabhängigkeit der Minoritätsladungsträger-Lebensdauer τ_n und des Shunt-Widerstands für beide Anlagen. Eine erste empirische Analyse legt nahe, dass der Shunt-Widerstand mit der Bandlücke und der Temperatur in der gleichen Weise skaliert wie die GR-Komponente. Darin könnte begründet sein, dass Konzepte, die zur GR-Reduktion erfolgreich sind, auch den Shunt-Anteil reduzieren können. Eine detaillierte Leistungsanalyse wird schließlich zu optimierten T2SL-IR-FPAs mit reduziertem Dunkelstrom führen. Diese werden es ermöglichen, künftig höhere Betriebstemperaturen und Optiken mit größerer F-Zahl einzusetzen.