

# EXCESS NOISE IN InAs/GaSb SUPERLATTICES

ANDREAS WÖRL

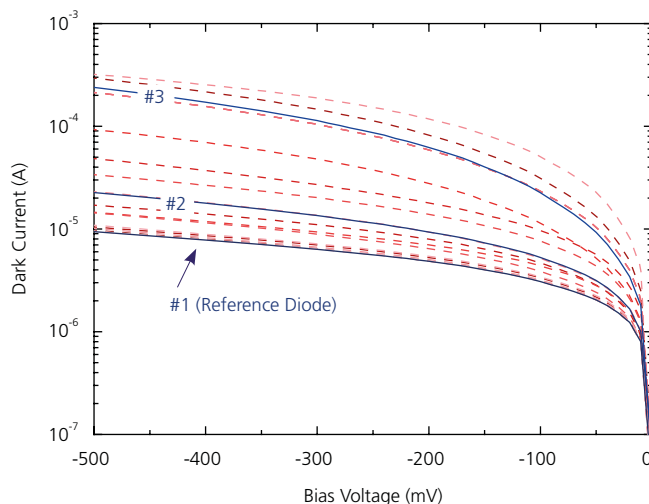
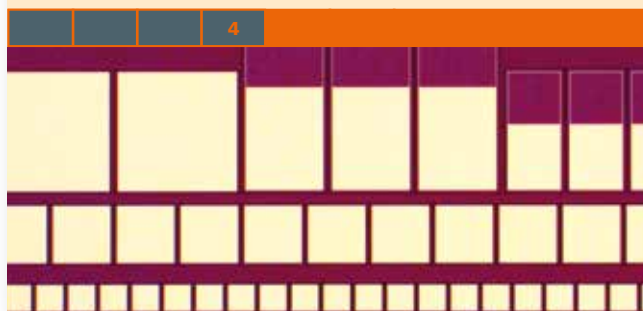
TEL. +49 761 5159-461

ANDREAS.WOERL@IAF.FRAUNHOFER.DE

## SPOT ON – NOISE PROPERTIES

- ANALYSIS OF WHITE NOISE IN InAs/GaSb SUPERLATTICE INFRARED PHOTODIODES
- PROOF OF VALUE OF MCINTYRE'S MODEL
- AVALANCHE PROCESSES AS THE ROOT CAUSE OF EXCESS NOISE

### TECHNOLOGY READINESS LEVEL



**1** Dark current for a set of 21 LWIR InAs/GaSb superlattice photodiodes at 77 K. The bulk dark current found in this material is exemplified by the reference diode #1. The photodiodes #2 and #3 are typical examples for photodiodes with increased dark current.

*Dunkelstrom von 21 LWIR InAs/GaSb-Übergitter-Photodioden bei 77 K. Der Dunkelstrom des Volumenmaterials ist durch die Referenzdiode #1 veranschaulicht. Die Photodioden #2 und #3 sind typische Beispiele für Dioden mit erhöhtem Dunkelstrom.*

The signal-to-noise ratio is the most important figure of merit of InAs/GaSb superlattice infrared photodetectors. Nevertheless, these photodetectors' noise properties are not very well understood. Fraunhofer IAF is thus investigating the low-frequency white-noise behavior of a larger set of InAs/GaSb superlattice infrared photodiodes. In contrast to the commonly used shot-noise model, McIntyre's excess-noise model describes the experimentally observed noise quite well over a wide range of reverse bias voltage, frequency and dark current. Avalanche multiplication processes within high electric field domains localized around macroscopic defects apparently lead to increased dark current and excess noise.

To improve the signal-to-noise ratio of InAs/GaSb superlattice (SL) infrared (IR) photodetectors, a thicker photon absorption layer can be grown which maximizes the signal. Due to the large diffusion length of minority carriers in this material system, not only electrons generated within the space-charge region, but also electrons generated along the absorber region contribute to the resulting photocurrent signal. The shot-noise model is commonly used to correlate dark current with noise.

For the investigation of noise properties Fraunhofer IAF developed a low-noise measurement setup, using an automated switching unit to investigate large sets of mid-wave infrared (MWIR, 3 – 5  $\mu\text{m}$ ) and long-wave infrared (LWIR, 8 – 12  $\mu\text{m}$ ) p-i-n photodiode (PD) devices at 77 K, which allows to measure noise currents down to the femtoampere range. For these studies, dielectrically passivated mesa devices with a size of 400 x 400  $\mu\text{m}^2$  (Fig. 3) were used instead of array-sized devices with a sidewall length between 15  $\mu\text{m}$  and 40  $\mu\text{m}$ . The bulk material for both is limited by Shockley-Read-Hall processes within the space-charge region. Analyzing the dependence of the total dark current density versus the perimeter-to-area ratio of devices with varying mesa sizes shows that the total current density in large diodes is dominated by bulk currents instead of sidewall currents. In both sets of large area devices, the distribution of reverse bias dark current showed a significant spread over three orders of magnitude. In particular

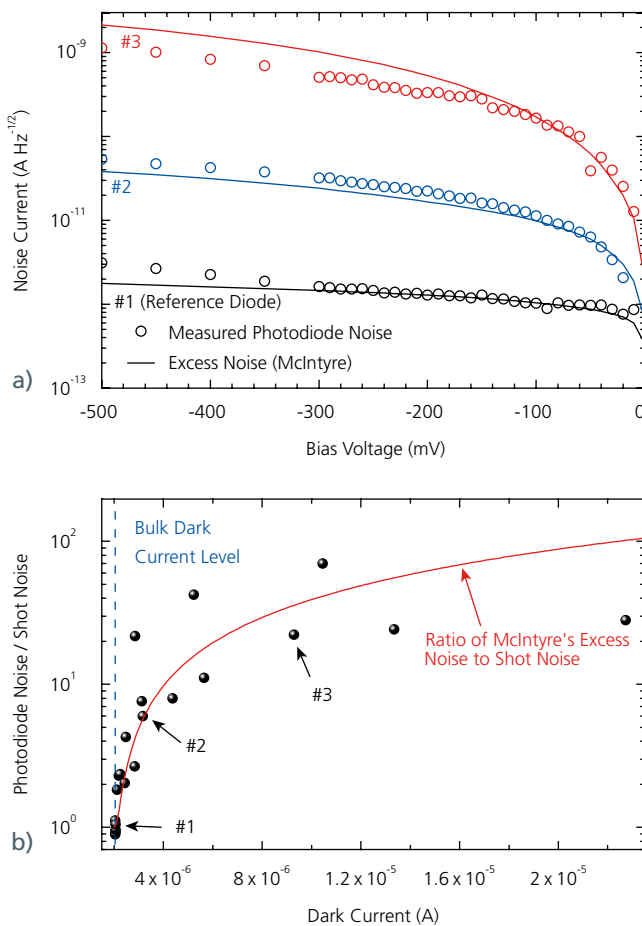
# ZUSATZSTROMRAUSCHEN VON InAs/GaSb-ÜBERGITTERN

**Die wichtigste Eigenschaft von InAs/GaSb-Übergitter-Infrarot-Photodetektoren ist ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Das Verhalten des Stromrauschens dieser Photodetektoren ist dennoch nicht ausreichend erforscht. Deshalb wurde am Fraunhofer IAF das niederfrequente, weiße Rauschen einer größeren Anzahl von InAs/GaSb-Übergitter-Infrarot-Photodioden untersucht. Das Rauschmodell von McIntyre beschreibt das experimentell gewonnene Stromrauschen über einen weiten Spannungs-, Frequenz- und Dunkelstrombereich sehr gut – im Gegensatz zu dem gemeinhin verwendeten Schrotrauschmodell. Es zeigt, dass der erhöhte Dunkelstrom und das zusätzliche Stromrauschen durch Lawinenverstärkungsprozesse in Bereichen hoher Feldstärken ausgelöst werden, die um makroskopische Gitterdefekte ausgebildet sind.**

Um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis von InAs/GaSb-Übergitter-Infrarot-Photodetektoren zu erhöhen, kann eine dickere Absorptionsschicht gewachsen werden. Das Signal kann demnach maximiert werden, da aufgrund der großen Diffusionslänge von Minoritätsladungsträgern in diesem Materialsystem nicht nur Elektronen zum resultierenden Photostromsignal beitragen, die in der Raumladungszone generiert werden, sondern auch Elektronen, die in der Absorptionsschicht generiert werden. Für gewöhnlich wird das Schrotrauschmodell herangezogen, um den Dunkelstrom mit dem Stromrauschen zu verknüpfen. Um das generelle Verhalten des Stromrauschens zu erforschen, muss eine große Anzahl an Photodioden untersucht werden.

Das Fraunhofer IAF hat einen rauscharmen, automatisierten Messaufbau inklusive einer Schaltmatrix entwickelt, mit dem bei 77 K Photodioden untersucht werden, die sensitiv sind für Infrarotstrahlung des mittleren (MWIR, 3 – 5  $\mu\text{m}$ ) und des langen (LWIR, 8 – 12  $\mu\text{m}$ ) Wellenlängenbereichs. Dadurch ist es möglich, das Stromrauschen bis in den Femtoamperebereich aufzulösen. Anstelle von typischen kleinflächigen Dioden der Detektormatrizen mit Kantenlängen zwischen 15  $\mu\text{m}$  und 40  $\mu\text{m}$  wurden für diese Studien dielektrisch passivierte Dioden mit einer Fläche von 400 x 400  $\mu\text{m}^2$  verwendet (Abb. 3). Das Volumenmaterial der MWIR- und LWIR-Detektoren ist durch Shockley-Read-Hall-Prozesse innerhalb der Raumladungszone dominiert. In großflächigen Dioden wird die Gesamtdunkelstromdichte vom Volumenstrom dominiert, nicht von Oberflächenströmen. Dies wird durch die Analyse der Abhängigkeit der Gesamtdunkelstromdichte vom Umfang-zu-Flächen-Verhältnis mit Dioden unterschiedlich großer Flächen deutlich. Die Verteilung des Dunkelstroms bei Rückwärtsspannung zeigt in den Messreihen mit großflächigen Dioden eine signifikante Spanne über drei Größenordnungen hinweg. Weiterhin zeigt sich besonders für die MWIR-Dioden, dass nur wenige großflächige Dioden überhaupt die Dunkelstromdichte des Volumenmaterials erreichen, welche an kleinflächigen Referenzdioden auf selbigen Wafern gemessen wurde. Dieses Dunkelstromverhalten von großflächigen Dioden wird makroskopischen Defekten mit typischen Distanzen von wenigen hundert Mikrometern zugeschrieben. Anhand von 21 LWIR-Dioden wurde die große Streuung des Dunkelstroms von großflächigen Dioden untersucht (Abb. 1).

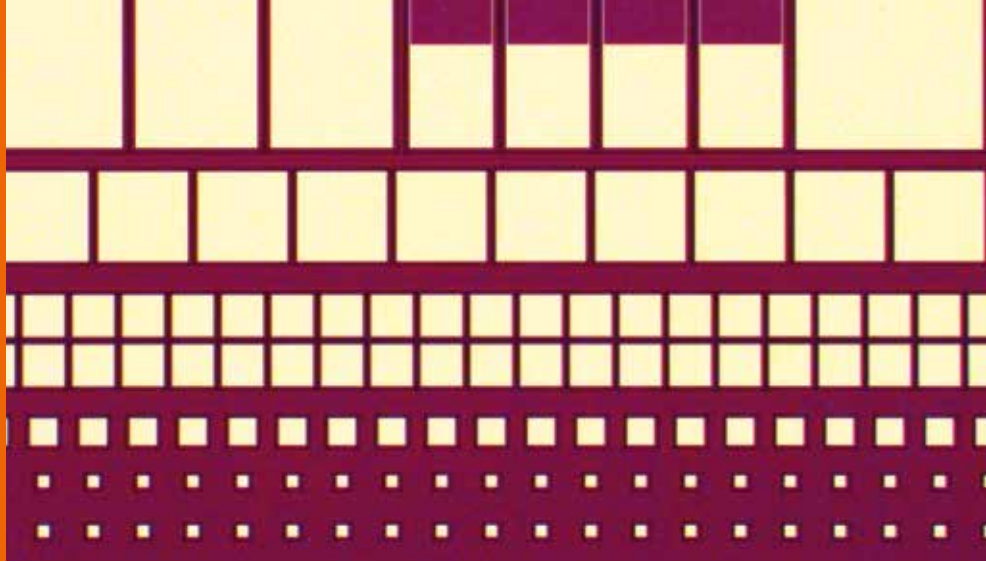
regarding the MWIR diodes, few large-sized diodes achieved a dark current density close to the dark current level of the bulk as measured on small-sized reference diodes on the same wafer. This behavior of large sized diodes is attributed



**2** (a) White-noise current of the exemplified LWIR photodiodes #1 to #3 at 77 K which are marked in Fig. 1 and 2b. (b) Ratio of measured photodiode noise at 77 K and 50 mV reverse bias voltage to shot-noise for a set of 21 LWIR InAs/GaSb superlattice photodiodes. (a) Weißes Stromrauschen der exemplarischen LWIR-Photodioden #1 bis #3 aus Abb. 1 und 2b bei 77 K. (b) Verhältnis des gemessenen Stromrauschens bei 77 K und 50 mV Rückwärtsspannung zum Schrotrauschen der 21 LWIR InAs/GaSb-Übergitter-Photodioden.

to the presence of macroscopic defects with typical distances of a few hundred microns. To investigate the large spread in dark current on large diodes, a set of samples with 21 LWIR diodes has been analyzed (Fig. 1). The noise properties in the white part of the noise spectrum at 1500 – 1600 Hz under -50 mV reverse bias voltage were measured at 77 K. At this bias voltage, the plotted diodes do not show a 1/f-noise behavior in this frequency range. The shot-noise expression only explains the noise of devices with a dark current close to bulk level. An increasing deviation of the observed noise from the expected shot-noise is found for increasing dark current. Instead, the well-known excess-noise model developed by McIntyre (IEEE Trans. Electron Devices 13, 164, 1966) could be adapted over a wide range of reverse bias voltage to fit the general behavior of the entire data set for both sets of devices (Fig. 2a). McIntyre's model for electron injection into the high-field domain is used, while the ratio of device dark current to reference bulk dark current for the experimentally defined multiplication factor  $M$  is implemented in McIntyre's model.

For MWIR and LWIR devices, a different  $k$ -ratio relating the hole and electron ionization coefficients is used to explain experimental data (MWIR:  $k = 0$ , LWIR:  $k = 100$ ). Fig. 2b compares the ratio of experimentally observed PD noise to shot-noise for 21 LWIR diodes in dependence of the dark current at -50 mV reverse bias voltage. If diodes with increased dark current obeyed the common shot-noise model, there should be a ratio equal to one, independent of dark current. However, the ratio generally increases with dark current. The excess-noise model evidently reproduces the general trend of the experimentally observed noise data rather well. Tentatively, the presence of high electric field domains around sites of macroscopic defects gives rise to white excess-noise in InAs/GaSb SL PDs. McIntyre's excess-noise model thus successfully translates the dark current distribution of a larger set of devices into noise distribution in the white part of the spectrum. For the calculation of the signal-to-noise ratio based on dark current measurements, McIntyre's excess-noise model is hence much better suited than the widely used shot-noise expression.



3

**3 A single cleaved mesa-processed chip containing different types and sizes of test diodes.**

*Vereinzelte Mesa-prozessierte Teststrukturen mit Dioden unterschiedlichen Typs und Größen.*

Das Stromrauschen im weißen Teil des Rauschspektrums wurde zwischen 1500 – 1600 Hz bei 50 mV Rückwärtsspannung und einer Temperatur von 77 K ausgewertet. Bei dieser Spannung und in diesem Frequenzbereich zeigen die Dioden kein  $1/f$ -Rauschen. Das dazu gemeinhin verwendete Schrotrauschmodell erklärt das Stromrauschen von Dioden mit Dunkelströmen nahe dem Niveau des Volumenmaterials. Das experimentell beobachtete Stromrauschen weicht mit steigendem Dunkelstrom immer stärker von dem erwarteten Schrotrauschen der Dioden ab. Dagegen kann das bekannte Modell für zusätzliches Stromrauschen, entworfen von McIntyre (IEEE Trans. Electron Devices 13, 164, 1966) für Lawinendioden, adaptiert werden. Es entspricht über einen weiten Rückwärtsspannungsbereich dem generellen Verhalten des gesamten Datensatzes beider Wellenlängenbereiche (Abb. 2a). Dabei wurde das Modell von McIntyre für in die Hochfelddomäne induzierte Elektronen gewählt. Das Verhältnis vom Diodendunkelstrom zum Referenzdunkelstrom des Volumenmaterials wurde als experimentell bestimmter Multiplikationsfaktor  $M$  in das Modell von McIntyre implementiert.

Um die experimentellen Daten nachzuvollziehen, wurden unterschiedliche Werte für das Verhältnis des Löcher-zu-Elektronenionisationskoeffizienten für die MWIR- und LWIR-Dioden ermittelt (MWIR:  $k = 0$ , LWIR:  $k = 100$ ). Abb. 2b zeigt das Verhältnis des experimentell beobachteten Photodiodenstromrauschens zum Schrotrauschen der 21 LWIR-Dioden, aufgetragen über den Dunkelstrom bei 50 mV Rückwärtsspannung. Würden die Dioden mit erhöhtem Dunkelstrom dem gewöhnlichen Schrotrauschen folgen, müsste sich unabhängig vom Dunkelstrom ein Verhältnis von eins einstellen. Das Verhältnis steigt hingegen mit zunehmendem Dunkelstrom. Das Modell für zusätzliches Stromrauschen spiegelt den generellen Verlauf der experimentellen Stromrauschdaten offensichtlich besser wider.

Bereiche hoher Feldstärken, die um makroskopische Defekte ausgebildet sind, begründen anscheinend das zusätzliche weiße Stromrauschen von InAs/GaSb-Übergitter-Photodioden. Es ist bemerkenswert, dass mit dem Modell von McIntyre für zusätzliches Stromrauschen die Verteilung des Dunkelstroms einer größeren Anzahl von Dioden erfolgreich in eine Stromrauschverteilung im weißen Teil des Spektrums umgerechnet werden kann. Demzufolge ist für die Berechnung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses aus Dunkelstrommessungen das Modell von McIntyre für zusätzliches Stromrauschen adäquater als das ansonsten verbreitete Schrotrauschmodell.