

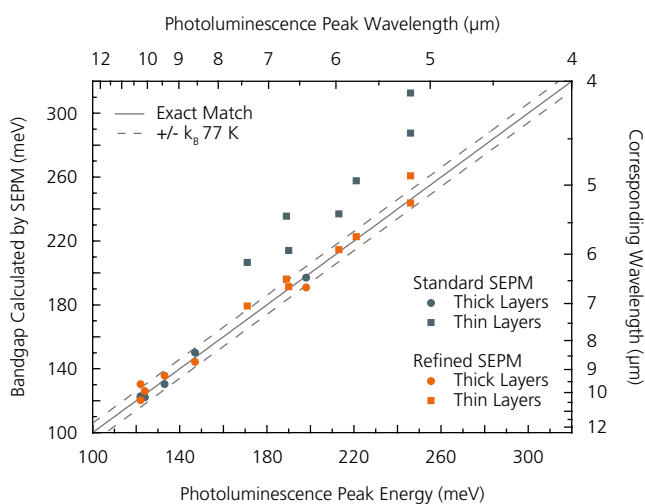
# InAs/GaSb SUPERLATTICE HETEROJUNCTION DETECTORS

ROBERT REHM

TEL. +49 761 5159-353

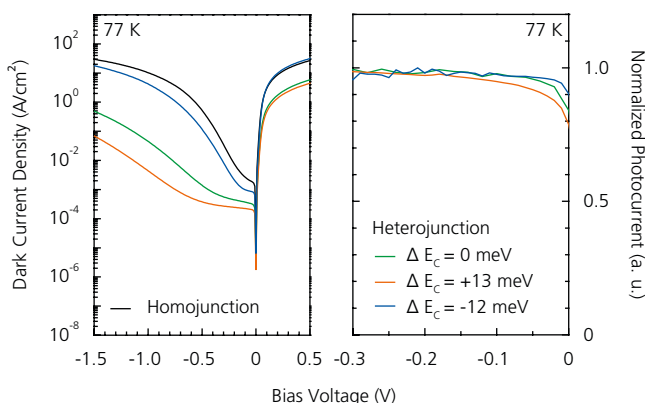
ROBERT.REHM@IAF.FRAUNHOFER.DE

In order to increase the operating temperature as well as the detection range of high performance imagers for the long wavelength infrared regime at 8 – 12  $\mu\text{m}$ , IAF has developed InAs/GaSb superlattice heterojunction devices with reduced dark current. The first series of detectors reveal about one order of magnitude less dark current compared to conventional homojunction photodiodes.



**1 A refined version of the Superlattice Empirical Pseudopotential Method (SEPM) allows accurate band gap calculations.**

*Eine verfeinerte Version der Superlattice Empirical Pseudopotential-Methode (SEPM) erlaubt genaue Bandstrukturberechnungen.*



Dark current density ( $J_D$ ) reduction in InAs/GaSb superlattice (SL) photodetectors for the long wavelength infrared (LWIR) atmospheric transmission window at 8 – 12  $\mu\text{m}$  is key to increase the operating temperature as well as the detection and identification range of high performance infrared imaging systems. In general,  $J_D$  is comprised of contributions from the bulk and the surface of the device. In small-sized imager pixels, the surface-related leakage  $J_D$  component needs to be suppressed by an appropriate surface passivation. The bulk component is affected by the material quality, i. e. carrier lifetime and defect density, as well as design parameters such as the doping profile or the band structure.

At present, an approach based on band structure engineered devices is considered as the most efficient way to reduce the bulk  $J_D$  in InAs/GaSb SLs. In contrast to conventional p-i-n photodiodes with a constant band gap along the growth direction throughout the entire device, this approach employs a heterojunction to suppress the Shockley-Read-Hall (SRH) carrier generation in the space-charge region, which limits homojunction p-i-n diodes. Since the photocurrent of InAs/GaSb SL absorbers is mostly carried by minority electrons, both conduction band edges have to be exactly matched at the heterointerface for an unimpeded flow of photoelectrons. Otherwise, the full quantum efficiency of the device can only be obtained by reducing the residual conduction band barrier by operating the device at a higher bias voltage, which often comes with the penalty of increased  $J_D$ .

**2 Comparison of dark current density (left) and normalized photocurrent (right) of homo- and heterojunction devices.**

*Vergleich der Dunkelstromdichte (links) und des normalisierten Photostroms (rechts) von Bauelementen mit Homo- und Heteroübergang.*

# InAs/GaSb-ÜBERGITTER-DETEKTOREN

Zur Erhöhung der Betriebstemperatur und Detektionsreichweite von leistungsstarken, bildgebenden Detektoren für das langwellige Infrarot entwickelt das Fraunhofer IAF InAs/GaSb-Übergitterbauelemente mit Heteroübergang, welche einen reduzierten Dunkelstrom erzielen. Die erste Serie von Detektoren zeigt im Vergleich mit herkömmlichen Photodioden mit Homoübergang einen um den Faktor 10 reduzierten Dunkelstrom. Die wesentlichen Bandstrukturberechnungen wurden mit einer verfeinerten Version der sogenannten Superlattice Empirical Pseudopotential-Methode durchgeführt.

Die Reduktion der Dunkelstromdichte  $J_D$  in InAs/GaSb-Übergitter-Photodetektoren für das atmosphärische Transmissionsfenster bei Wellenlängen von 8 – 12  $\mu\text{m}$  ist der Schlüssel zur Erhöhung der Betriebstemperatur sowie der Detektions- und Identifikationsreichweite von bildgebenden Infrarotsystemen. Im Allgemeinen setzt sich  $J_D$  aus Oberflächen- und Volumenbeiträgen zusammen. Mithilfe einer geeigneten Passivierung können Oberflächenleckströme in kleinen Kamerapixeln unterdrückt werden. Die Volumenkomponente wird durch die Materialqualität beeinflusst, d. h. durch die Ladungsträgerlebensdauer und die Defektdichte ebenso wie durch Designparameter wie das Dotierprofil oder die Bandstruktur.

Als besonders vielversprechend wird der Ansatz erachtet, in InAs/GaSb-Übergittern die Reduktion des Volumendunkelstroms über das Bandstrukturdesign des Bauelements zu bewerkstelligen. Im Gegensatz zu herkömmlichen p-i-n-Photodioden, welche entlang der Wachstumsrichtung eine konstante Bandlücke durch das gesamte Bauelement hindurch aufweisen, verwendet der moderne Ansatz Heteroübergänge zur Unterdrückung von Shockley-Read-Hall (SRH)-Prozessen in der Raumladungszone und überwindet so diese Limitierung herkömmlicher Übergitterdioden. Da der Photostrom in InAs/GaSb-Übergitterabsorbern hauptsächlich durch Minoritätselektronen getragen wird, müssen am Heteroübergang die Leitungsbandkanten der beiden Materialien genau angepasst werden, um einen ungehinderten Fluss der Ladungsträger zu erlauben. Andernfalls kann der volle Quantenwirkungsgrad des Bauelements nur durch den Betrieb bei erhöhter Spannung erreicht werden, was oft mit erhöhtem  $J_D$  einhergeht.

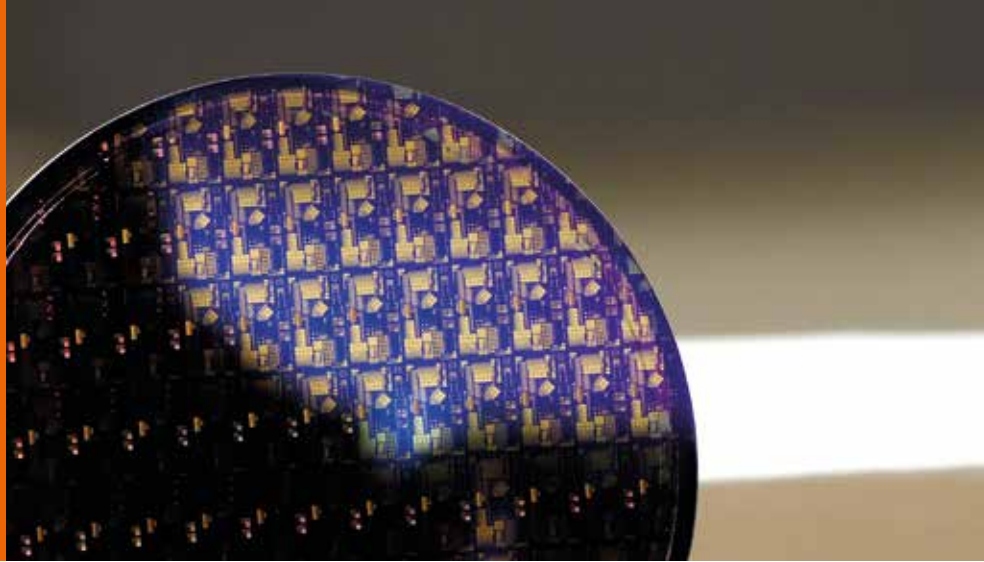
Der Entwurf von Bauelementen mit angepassten Leitungsbandkanten ist komplex und benötigt Unterstützung durch eine bestätigte theoretische Methode zur Berechnung der Bandstruktur in InAs/GaSb-Übergittern. Hierfür wurde die sogenannte Superlattice Empirical Pseudopotential-Methode (SEPM) implementiert, welche 1999 von G. C. Dente und M. L. Tilton entwickelt wurde. Zu Anfang wurde die SEPM in ihrer herkömmlichen Form implementiert, wobei jede Übergitterperiode aus zwei individuellen Schichten, InAs und GaSb, zusammengesetzt wird. Zur Bewertung der Genauigkeit der berechneten Bandlücke wurde mit präzise kalibrierten Wachstumsraten für beide Komponenten eine Serie von 13 InAs/GaSb-Übergitterproben mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE) gewachsen. Die blauen Datenpunkte in Abb. 1 vergleichen die Bandlückenenergie mit dem Maximum des Photolumineszenzspektrums bei 10 K, d. h. dem experimentell direkten Zugang zur Übergitterbandlücke. Während bei hohen Teilschichtdicken ab etwa sieben Monolagen die Ergebnisse der herkömmlichen SEPM gut mit den experimentellen Daten übereinstimmen, wird die Bandlücke von InAs/GaSb-Übergittern bei dünneren Teilschicht-

The design of heterojunction devices with matched conduction band edges is complex and requires guidance by an approved theoretical method for the calculation of the InAs/GaSb SL band structure. It was decided to implement the Superlattice Empirical Pseudopotential Method (SEPM), developed by G. C. Dente and M. L. Tilton in 1999. Initially, the SEPM in its standard form was implemented, where each SL period is composed of two individual layers, namely InAs and GaSb. In order to assess the accuracy of the calculated band gap values, a set of 13 InAs/GaSb SL samples was grown by molecular beam epitaxy (MBE) with precisely calibrated growth rates for both components. The blue data in Fig. 1 compares the band gap data calculated by the standard form of the SEPM with the peak wavelength of the photoluminescence spectrum at 10 K, which is the most straight-forward way to experimentally gauge the SL band gap. While the standard SEPM shows good agreement with the experimental data for thick individual layers, in particular a GaSb layer thickness larger than seven monolayers, it clearly overestimates the band gap for InAs/GaSb SLs composed of thinner individual layers. Since the high gap part at the heterojunction needs to be fabricated with an SL composition with thin individual layers, it can be concluded that the conventional form of the SEPM is of limited use to guide the design of heterojunction devices.

Fraunhofer IAF has therefore developed a refined version of the SEPM which takes into account the sub-monolayer thin InSb-like interface layers which are grown below and on top of each GaSb layer in the SL to compensate for the tensile strain caused by the InAs component in each period. In addition, the refined model considers the incorporation of arsenic during growth of GaSb and InSb layers, which we believe is the dominant effect among several competing incorporation and segregation processes. Thus, in the refined SEPM each SL period is modeled as a four-component stack of  $\text{InAs}/\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  assuming a constant

x-value throughout the structure. For the 13 samples the average As content as determined from calibrated layer thickness and strain data amounted to  $x = 0.17$ . The orange data in Fig. 1 shows the comparison of the band gap results from the refined SEPM model with the experimental values. While the refinements only marginally affect the results for InAs/GaSb SLs composed of thick layers, the band gap value calculated for SLs with thin layers has been improved considerably and is now within  $\pm k_B T$  (at  $T = 77$  K) of the bisecting grey solid line for most samples.

Successful proof of our heterojunction device concept was achieved with a series of three InAs/GaSb SL samples. The design was based on a p-type absorber with a band gap of 124 meV (10.0  $\mu\text{m}$ ), which was combined with high gap N-type regions with band gaps of 149 meV, 163 meV and 178 meV and corresponding conduction band offsets of -12 meV, 0 meV, and +13 meV, respectively. For comparison, a homojunction p-i-n diode with the band gap of the absorber was realized. Fig. 2 shows  $J_D$  and the normalized photocurrent measured with a narrow-band IR filter, such that all photoelectrons are generated only in the absorber. As the band gap of the N-part increases,  $J_D$  decreases, since the rate of SRH transitions in the space charge region of the heterojunction decreases. For the same absorber band gap, the heterojunction with the highest band gap in the N-part shows about one order of magnitude lower  $J_D$  than a conventional homojunction design at low reverse voltage. Evidently, for a zero or slightly negative conduction band offset at the heterointerface, the photoresponse shows no distinct bias dependence. Hence, the refined SEPM seems very well suited for the design of advanced heterojunction devices with matched conduction band edges. Future device designs will make use of an even higher band gap in the N-part, which should allow further reduction of dark current in InAs/GaSb SL detectors for the LWIR.



3

**3 Fully processed 3" InAs/GaSb superlattice wafer with test structures.**

*Vollprozessierter 3"-InAs/GaSb-Übergitter-Wafer mit Teststrukturen.*

ten deutlich überschätzt. Da aber am Heteroübergang der Bauelementteil mit hoher Bandlücke durch ein Übergitter mit dünnen Teilschichtdicken gefertigt werden muss, ergibt sich, dass die SEPM in ihrer herkömmlichen Form für den Entwurf von Bauelementen mit Heteroübergang nur eingeschränkt tauglich ist.

Daher wurde am Fraunhofer IAF eine optimierte Version der SEPM entwickelt, welche die sub-Monolagen-dünnen, InSb-artigen Grenzflächen beinhaltet. Diese Grenzflächen werden in jeder Periode beidseits der GaSb-Teilschichten zur Kompensation, der durch die InAs-Schichten eingebrachten Zugspannung, gewachsen. Weiterhin berücksichtigt das verfeinerte Modell den Einbau von Arsen während des Wachstums von GaSb und InSb. Dies ist der dominante Effekt unter mehreren, beim Wachstum dieses Materials miteinander konkurrierenden, Einbau- und Segregationseffekten. Demnach wird jede Periode in der optimierten SEPM als Vier-Komponentenstapel  $\text{InAs/InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  modelliert, wobei ein konstanter  $x$ -Wert durch die gesamte Struktur angenommen wird. Für die 13 Proben ergibt sich aus den kalibrierten Daten für die Teilschichtdicken und der Gesamtverspannung als durchschnittlicher Arsengehalt ein Wert von  $x = 0,17$ . Die orangenen Datenpunkte in Abb. 1 zeigen den Vergleich der mittels der verfeinerten SEPM berechneten Bandlücke mit den experimentellen Daten. Das optimierte Modell beeinflusst kaum die Ergebnisse bei hohen Teilschichtdicken, aber die Ergebnisse für die Bandlückenenergie bei dünnen Teilschichtdicken werden beträchtlich verbessert. Diese liegen für die meisten Proben innerhalb von  $\pm k_B T$  (bei  $T = 77 \text{ K}$ ) um die Winkelhalbierende der Abb. 1.

Den erfolgreichen Nachweis unseres auf einem Heteroübergang beruhenden Bauelementkonzepts liefern wir mit einer Serie von drei InAs/GaSb-Übergitterproben. Der Bauelemententwurf basiert auf einem p-artigen Absorber mit einer Bandlücke von 124 meV, der jeweils mit einer N-Region mit hohem Bandabstand von 149 meV, 163 meV bzw. 178 meV und zugehörigen Leitungsbandoffsets von -12 meV, 0 meV bzw. +13 meV kombiniert wurde. Zu Vergleichszwecken wurde eine p-i-n-Diode mit Homoübergang realisiert. Abb. 2 zeigt  $J_0$  und den normierten Photostrom, gemessen mit einem schmalbandigen IR-Filter, sodass die Generierung von Photoelektronen auf den Absorber beschränkt ist. Mit zunehmender Bandlücke des N-Teils sinkt  $J_0$ , weil die Rate von SRH-Übergängen in der Raumladungszone am Heteroübergang abnimmt. Verglichen mit dem herkömmlichen Design mit Homoübergang zeigt bei gleicher Absorber-Bandlücke der Heteroübergang mit der höchsten Bandlücke im N-Teil ein ungefähr um eine Größenordnung reduziertes  $J_0$  bei geringer Rückwärtsspannung. Der Photostrom zeigt bei nominell exakter Leitungsbandanpassung und leicht negativem Leitungsband-Offset keine ausgeprägte Spannungsabhängigkeit. Daher erscheint die verfeinerte SEPM für den Entwurf von fortschrittlichen Heterobauelementen mit angepassten Leitungsbandkanten gut geeignet.