

Abschließender Sachbericht

TSPIG

THz-Sensorik mit plasmonischen integrierten GaN-Komponenten

Leibniz-Einrichtung: Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
Aktenzeichen: SAW-2014-FBH-1
Projektlaufzeit: 1.01.2014 – 30.04.2017
Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich

Inhalt

0	Executive Summary	2
1	Zielsetzung und Allgemeines	3
2	Technologieoptimierung und Transistordesign	3
3	Detektorentwicklung	6
3.1	Detektor-Design	6
3.2	Antenne und Integration mit Detektor	7
3.3	Messergebnisse	9
3.4	Neue Antennenstrukturen.....	10
3.5	Weitere Erkenntnisse zum Detektorverhalten	11
3.6	Detektion von Pulsen.....	12
4	THz-Kamera	13
5	Kooperationen	15
6	Wissenschaftlich-technische Highlights	16
7	Verwertung und weiterführende Arbeiten.....	16
7.1	Wirtschaftliche Verwertung	16
7.2	Weiterführende wissenschaftliche Arbeiten	16
7.3	Qualifikationsarbeiten	17
8	Literatur	17
8.1	Projekt-Publikationen (erschienen)	17
8.2	Projekt-Publikationen (in Vorbereitung)	19
8.3	Patente.....	19

0 Executive Summary

Das Projekt "THz-Sensorik mit plasmonischen integrierten GaN-Komponenten" adressiert die Entwicklung von neuartigen Detektoren für den Terahertz-Frequenzbereich (THz). Dieser Teil des elektromagnetischen Spektrums ist für die zerstörungsfreie Prüfung und Analyse von gasförmigen, flüssigen und festen Stoffen besonders geeignet. Er ermöglicht Radar- und Bildgebungsverfahren mit Auflösungen unter 1 mm mittels ungefährlicher Strahlung sowie die Analyse anhand von materialtypischen Spektren, die im THz-Bereich speziell ausgeprägt sind. Die derzeitigen THz-Spektroskopie-Systeme sind jedoch gekennzeichnet durch hohen Formfaktor und Gewicht, lange Messzeiten und hohe Kosten.

In dem vorliegenden Vorhaben sollten mit Hilfe der Gallium-Nitrid-Technologie (GaN) kompakte plasmonische THz-Detektoren mit hoher Empfindlichkeit entwickelt und realisiert werden. Diese Detektor-Technologie erlaubt skalierbare Focal-Plane-Arrays, arbeitet nahezu in Echtzeit und ist deutlich kostengünstiger als bestehende Technologien.

Dazu wurde ein vorhandener GaN-Halbleiterprozess für integrierte Schaltungen für die Eigenschaften der THz-Detektoren weiterentwickelt – durch Verwendung einer dedizierten Epitaxie-Schichtenfolge und die Herunterskalierung der High-Electron-Mobility-Transistoren (HEMTs) auf Gate-Längen bis 100 nm und Gate-Weiten um 3 μm . Diese miniaturisierten Transistorstrukturen wurden dann in die Antennenstrukturen integriert. Dadurch konnten die Verluste der Verbindung zwischen Empfangsantenne und Detektor minimiert werden. Ein spezielles Design der umgebenden Strukturen gewährleistet dabei die Unterdrückung parasitärer Oszillationen, die verlustfreie Auskopplung des Sensor-Signals und die Entkopplung zu benachbarten Elementen, wie sie für den Aufbau eines Arrays benötigt wird.

Im Rahmen der Arbeiten wurde eine Vielzahl von Antennenformen untersucht und realisiert, von denen besonders die Bow-Tie-Antenne und neuartige Schlitzantennen durch interessante Ergebnisse hervorzuheben sind.

Die so optimierten Detektoren erreichten breitbandig exzellente Sensitivitäten. So zeigt der Bow-Tie-GaN-Detektor im Bereich zwischen 400 GHz und 1.2 THz einen flachen Verlauf der Noise-Equivalent Power (NEP) mit einem Bestwert von 26 $\text{pW/Hz}^{0.5}$. Dies entspricht einer Verbesserung um den Faktor 5 gegenüber dem bisherigen Stand der Technik für GaN. Die NEP-Werte sind vergleichbar mit den besten konkurrierenden Detektorkonzepten (Schottky-Dioden, Silizium-basierte Detektoren), die GaN-Detektoren sind zudem robust gegen Übersteuerung durch hohe Strahlungsintensitäten und gegen ESD. Die Charakterisierung der Detektoren ergab darüber hinaus neue Erkenntnisse zur Wirkung des thermoelektrischen Effekts in plasmonischen Detektoren sowie zur Möglichkeit der Detektion von fs-Pulsen.

Um die Integrationsfähigkeit der GaN-Detektoren und die Realisierbarkeit einer THz-Kamera für Materialprüfungs-Anwendungen zu demonstrieren, wurden 12 x 12 Arrays mit 144 Elementen realisiert, zusammen mit der entsprechenden Auswerte-Elektronik aufgebaut und die Funktionalität des Systems nachgewiesen.

Aus den Projektergebnissen entstanden bisher 11 Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge, davon 3 in begutachteten Fachzeitschriften und 5 auf renommierten einschlägigen Konferenzen. Zur Sicherung des IP wurde ein Patent angemeldet. Die Detektoren wurden zudem im Rahmen mehrerer Kooperationen erfolgreich Partnern für Experimente zur Verfügung gestellt. Ein Projektantrag im Rahmen des VIP+ Programms des BMBF ("Validierung des technologischen und gesellschaftlichen Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung") wird gerade vorbereitet. Darüber hinaus bieten die erzielten Ergebnisse mehrere Ansatzpunkte für weiterführende Forschungsvorhaben.

1 Zielsetzung und Allgemeines

Der Terahertz-Frequenzbereich ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen für die Spektroskopie und die zerstörungsfreie Prüfung von Materialien. Die derzeit verfügbaren THz-Systeme sind jedoch durch limitierte Sensitivität, eingeschränkte Mobilität, langwierige Messaufnahme und hohe Kosten gekennzeichnet.

Ziel des Vorhabens TSPiG war es deshalb, mit Hilfe der Gallium-Nitrid-Technologie neuartige kompakte THz-Detektoren und Detektor-Arrays mit hoher Empfindlichkeit zu entwickeln, die plasmonische Effekte nutzen. Diese Effekte beruhen auf Ladungsträgerdichte-Wellen im Kanal eines Feldeffekt-Transistors und erlauben einen Betrieb weit oberhalb der Grenzfrequenz des konventionellen Transistors. Die Detektor-Technologie erlaubt skalierbare Focal-Plane-Arrays, arbeitet nahezu in Echtzeit und ist um Größenordnungen kostengünstiger als bestehende Systeme. Die im Vorhaben vorgeschlagenen GaN-Detektoren sollten im Frequenzbereich von 0.5 THz bis mindestens um 1 THz arbeiten und äquivalente Rauschleistungen um $50 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ aufweisen. Ein zentrales Anliegen des Projektes war es, die Empfindlichkeit der THz-Detektoren durch aggressive Skalierung der Strukturgrößen der Bauelemente im GaN-Prozess zu steigern. Die Array-Fähigkeit sollte anhand einer Kamera-Anordnung mit einer Pixel-Zahl von bis zu 144 demonstriert werden.

Die erreichten Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten im Detail beschrieben, untergliedert gemäß Arbeitsplan nach den Themen Technologieoptimierung und Transistordesign, Detektorentwicklung, integriertes Antennendesign und THz-Kamera.

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit dem Physikalischen Institut (Gruppe Prof. Roskos) und dem Goethe-Leibniz-Terahertz-Zentrum der Goethe-Universität Frankfurt durchgeführt. An der Goethe Universität Frankfurt (GUF) wurden die neu entwickelten THz Detektoren und Detektorarrays getestet und charakterisiert.

2 Technologieoptimierung und Transistordesign

Für die Realisierung der THz-Detektoren wurde der GaN-HEMT-MMIC-Prozess des FBH als Ausgangspunkt verwendet. Dabei werden zunächst auf einem 4 Zoll nichtleitenden Siliziumcarbid (SiC) Substrat mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}/\text{GaN}$ -Heterostrukturen gewachsen. Anschließend wird eine MMIC-Prozessierung durchgeführt.

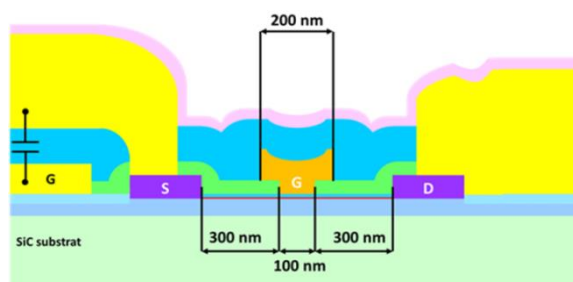


Abb. 1: Schematische Darstellung GaN HEMT (mit den neu realisierten skalierten Dimensionen).

Der verwendete GaN-HEMT-MMIC-Prozess lässt sich in zwei Phasen aufteilen: In der ersten Phase wird der Transistor realisiert (siehe Abb. 1). Hierbei werden als erstes die ohmschen Kontakte zum zweidimensionalen Elektronengas (2DEG) hergestellt. Durch eine Ionenimplantation wird dann das 2DEG außerhalb der gewünschten Flächen inaktiviert. Anschließend wird eine Siliziumnitrid (SiN) Passivierung aufgetragen, in die die Öffnungen für die

Gate-Metallisierung geätzt und der Gate-Kontakt realisiert werden. Dies definiert die Gate-Länge des HEMT. Um den ohmschen Widerstand der Gate-Zuführung zu verringern, wird ein pilzförmiger Querschnitt der Gate-Elektrode verwendet (Gate-Kopf).

In der zweiten Phase des Prozesses werden die passiven Elemente des MMIC-Prozesses gefertigt. Der Prozess beinhaltet Nickel-Chrom-Dünnschichtwiderstände, MIM-Kondensatoren und zwei Metallisierungslagen (siehe Abb. 2). Die Metallisierungslagen sind durch eine 200 nm dicke SiN-Schicht voneinander isoliert. Da diese Schichten in ihrer lateralen Formgestaltung nicht beschränkt sind, können im Rahmen dieses Schichtpaketes individuell entworfene Antennenstrukturen und MIM-Kondensatoren realisiert werden.

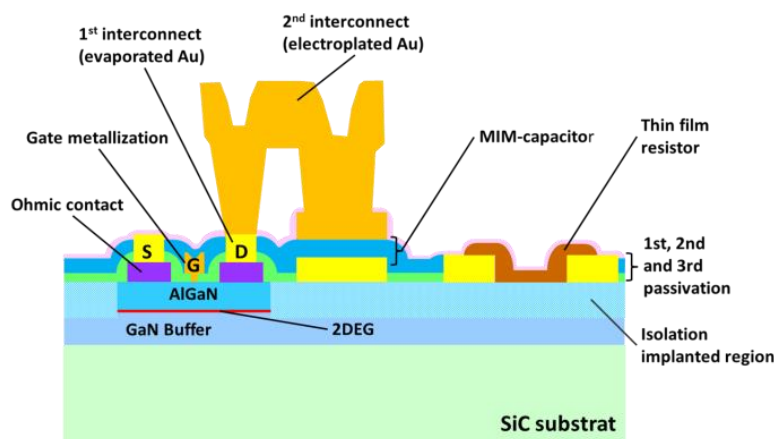


Abb. 2: Schematische Darstellung des GaN-HEMT-MMIC-Prozesses.

Dieser Grundprozess mit der ursprünglichen Strukturgröße von $0.25\ \mu\text{m}$ Gate-Länge wurde im Rahmen des TSPiG-Projektes in mehrfacher Weise modifiziert bzw. weiterentwickelt:

(i) Epitaxie-Schichtpaket: Für die THz-Detektoren wurden zwei verschiedene Epitaxien verwendet, eine $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}/\text{GaN}$ – Heterostruktur, die einen Abstand zwischen Gate und 2DEG von 22 nm aufweist, und eine $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}/\text{GaN}$ – Heterostruktur mit einem Gate-2DEG-Abstand von 12 nm. Die Erhöhung des Aluminiumanteils in der Heterostruktur steigert die Elektronenmobilität in dem zweidimensionalen Elektronengas. Durch die Reduktion des Abstandes vom Gate zum 2DEG wird einerseits die Steilheit des GaN-HEMT erhöht, andererseits ermöglicht diese Anordnung eine besser geführte Ausbreitung und Steuerung von Elektronendichtewellen (Plasmonen) im THz-Bereich durch das Gate des HEMT Transistors.

(ii) Skalierung der Transistor-Dimensionen: Zur Steigerung der Detektor-Sensitivität wurden die Abmessungen des GaN-HEMT deutlich verringert. Die Gate-Länge wurde von 250 nm auf 100 nm reduziert. Gleichzeitig wurde der Gate-Kopf von 750 nm auf 200 nm und der Abstand vom Kanal zu den ohmschen Kontakten von 750 nm auf 300 nm verkürzt. Damit konnte der für die THz-Detektion parasitäre ungesteuerte 2DEG-Bereich reduziert werden. Die verringerten Dimensionen des GaN HEMTs sind in Abb. 1 dargestellt.

Zusätzlich zu dieser lateralen Reduktion der Dimensionen wurde die Gate-Weite von bisher minimal $50\ \mu\text{m}$ auf $3\ \mu\text{m}$ verringert. Abb. 3 zeigt die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines solchen Transistors mit $3\ \mu\text{m}$ Gate-Weite. In dem Detailbild ist die pilzförmige Struktur des Gate-Kontaktes exemplarisch dargestellt.

Der durch die Skalierung der Transistoren und die spezielle Epitaxie weiterentwickelte GaN-Prozess wurde für die Realisierung der THz Detektoren verwendet. Die GaN-HEMTs wurden dabei direkt in die Antennenstrukturen integriert. Dies stellt ein Alleinstellungsmerkmal dieses GaN-HEMT Prozesses für THz-Detektoren dar und erlaubt die kompakte Realisierung von MIM-Kapazitäten in unmittelbarer Nähe des Transistors. Dies wurde genutzt, um einen HF-

Kurzschluss direkt an den Kontakten des Transistors herzustellen. Auch wurde die jeweilige integrierte Antennenstruktur durch einen Kurzschluss von Nachbarstrukturen im Array entkoppelt.

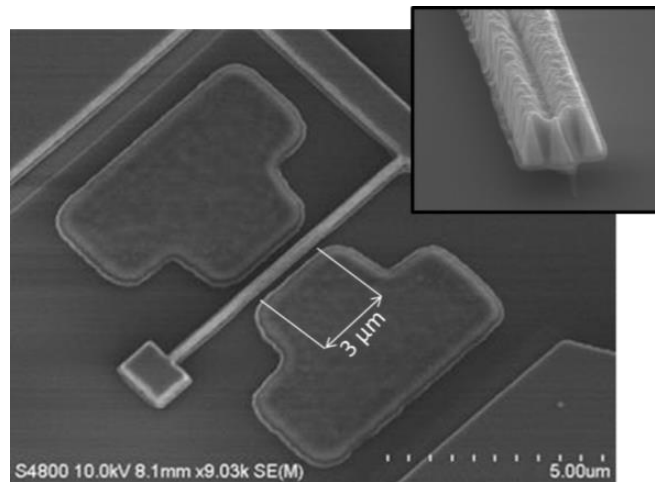


Abb. 3: Prozessierter Transistor mit 3 µm Gate-Weite, mit Detaildarstellung des Gate-Kopf. Deutlich sichtbar sind die skalierten Source- und Drain-Kontaktstrukturen.

Abb. 4 zeigt das Mikroskopiebild eines THz-Detektors mit seinen Anschluss pads und das dazugehörige Ersatzschaltbild. Die großen Kondensatorstrukturen C1 und C2 unterbinden zusammen mit den Widerständen R1 und R2 niederfrequente Oszillationen. Die Kapazitäten C3, C4, C5 dienen zum Entkoppeln der jeweiligen Antennenstruktur von ihrem Nachbarn. Schließlich dient der Kondensator C6 dazu, einen Kurzschluss zwischen dem Gate- und Source-Anschluss des Transistors zu erzeugen für einen optimalen Detektorbetrieb. Der Kondensator ist direkt mit einem Arm der Antennenstruktur verbunden und überlappend realisiert, um eine direkte Kopplung zum THz-Signal zu erzeugen. Dieser Entwurf erlaubt eine nahezu induktivitätsfreie Realisierung des THz-Detektors, die ansonsten die Detektoreigenschaften beeinträchtigen würde.

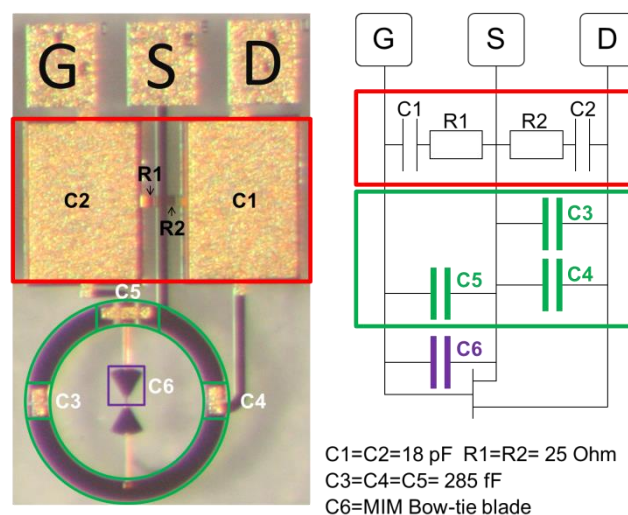


Abb. 4: Bow-Tie-Antennenstruktur mit einem THz-Detektor mit dem dazugehörigen elektrischen Ersatzschaltbild.

Für THz-Strahlung ist das SiC-Substrat (mit einer Dicke von 525 μm) transparent. Dadurch ist es möglich, die THz-Strahlung durch das Substrat einzuspeisen. Um die Strahlung in das Substrat einzukoppeln, wird eine Linse an der Substratunterseite angebracht. Die Verwendung einer Silizium-Linse, die einen ähnlichen Brechungsindex wie das SiC-Substrat ($n \sim 3.16$) aufweist, vermeidet zusätzliche störende Brechungsebenen.

3 Detektorentwicklung

3.1 Detektor-Design

Die Detektorentwicklung folgte zwei Hauptzielen:

- GaN HEMT und Antenne verschmelzen zu einer THz-Detektorstruktur.
- Die THz-Detektoren sollen als Pixel in einem größeren zweidimensionalen THz-Detektorarray verwendet werden können.

Die Zusammenfassung mehrerer THz-Detektorstrukturen zu einem größeren zweidimensionalen THz-Detektorarray macht es notwendig, potenzielles Übersprechen zu Nachbarstrukturen zu unterbinden. Dafür wurde um die THz-Detektorstruktur eine HF-Masse realisiert, die Frequenzen größer als 100 GHz kurzschließt. Abb. 4 zeigt, wie die THz-Detektorstruktur ringförmig von der HF-Masse eingeschlossen wird, so dass das Fernfeld der Antennenstruktur nicht gestört wird. Im Ersatzschaltbild und der Photographie ist die HF-Masse grün hervorgehoben. Ausgehend von der THz-Detektorstruktur wird durch die umgebende HF-Masse ein Tiefpassverhalten mit einer Grenzfrequenz von 100 GHz erzeugt, um im Zusammenwirken mit einem Widerstandsnetzwerk Oszillationen in diesem Bereich für alle Bias-Bedingungen zu unterdrücken.

Durch die Parallelschaltung befinden sich die Widerstände des Stabilitätsnetzwerks nicht im Drain-Source-Messpfad, wodurch sie kein zusätzliches Rauschen bzw. Spannungsabfall im Messsignal verursachen können. Die Kapazitäten und Widerstände sind in Abb. 4 rot hervorgehoben. Die Antastpads und das Stabilitätsnetzwerk gehören nicht zur THz-Detektorstruktur und haben im normalen THz-Detektorbetrieb keine Funktion.

Abb. 5 zeigt eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme des THz-Detektors ohne das Stabilitätsnetzwerk und Antastpads.

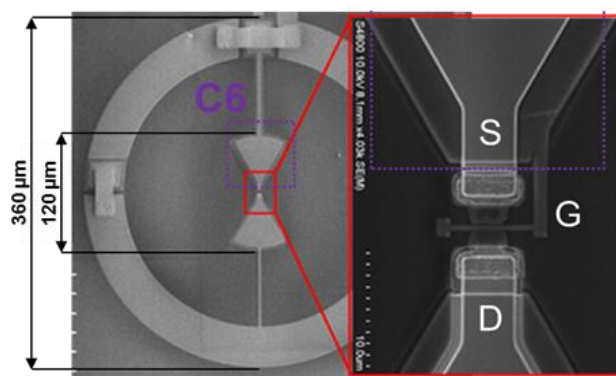


Abb. 5: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der THz-Detektorstruktur, mit Detailbild des GaN HEMTs. Im Detailbild sieht man die direkte Integration des HEMT-Transistors mit der Antennenstruktur, die die notwendigen Verbindungen miniert.

3.2 Antenne und Integration mit Detektor

Für die Antennenstruktur wird ein Bow-Tie-Antennendesign verwendet. Das Antennendesign wurde für den Frequenzbereich von 0.4 ... 1.2 THz ausgelegt. Um über den gesamten Frequenzbereich ein möglichst konstantes Verhalten bezüglich der Fußpunktimpedanz und des Fernfeldes zu erzielen, wurde ein Öffnungswinkel von 60° verwendet. Die Länge der Antennenflügel beträgt 60 μm ($\lambda/4$ bei 400 GHz). Die DC-Zuführungen liegen in den Symmetrieebenen der Antennenstruktur, um die Abstrahlungseigenschaften nicht zu beeinflussen.

Für maximale Sensitivität des THz-Detektors muss entsprechend der Dyakonov-Shur-Theorie zum plasmonischen Verhalten des Feldeffekttransistors die THz-Strahlung asymmetrisch in den GaN-HEMT-Kanal eingekoppelt werden. Um dieses zu erreichen, liegt der Speisepunkt der Antennenstruktur zwischen der Drain- und der Gate-Elektrode, die Gate-Elektrode stellt dabei das HF-Bezugspotenzial da (im Folgenden als Drain-Gate-Terminal bezeichnet). Um die Einkopplung von THz-Strahlung zwischen Source- und Gate-Elektrode des GaN-HEMT-Kanals zu unterbinden, wird das so gebildete Source-Gate-Terminal durch einen MIM-Kondensator kurzgeschlossen. Abb. 6 zeigt schematisch den GaN HEMT mit der HF- und DC-Verschaltung.

Um diese Verschaltung zu realisieren, bildet der obere Antennenflügel einen MIM-Kondensator zwischen dem Gate- und dem Source-Kontakt. Die Detaildarstellung in Abb. 5 ist eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der GaN-HEMT-THz-Detektorstruktur im Fußpunkt der Bow-Tie-Antenne. Es ist gut zu erkennen, dass die Gate-Elektrode die untere MIM-Kondensator Elektrode und die Source-Elektrode die obere MIM-Elektrode ausbilden.

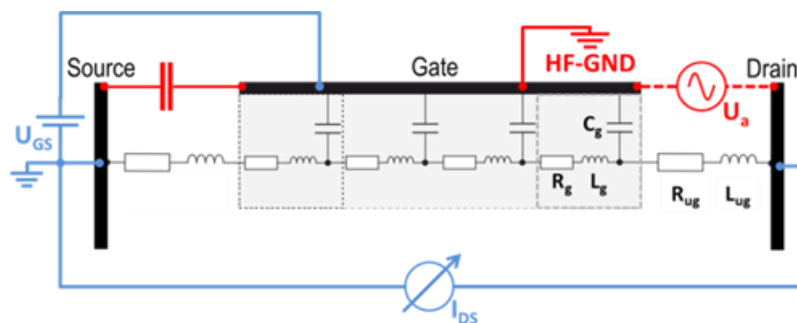


Abb. 6: Schema zur DC-(Blau) und HF-(Rot) Verschaltung des THz-Detektors.

Abb. 7 zeigt die 3D elektromagnetische Simulation der Impedanz des Source-Gate- und des Drain-Gate Terminals als Funktion der Frequenz im Bereich von 0.05 ... 2.2 THz. Die Simulation erfasst den gesamten Layer-Aufbau des MMIC-Prozesses. Am Drain-Gate-Terminal wird im Frequenzbereich von 90 GHz bis 130 GHz die HF-Masse in den hochohmigen Impedanzbereich mit einem Realteil oberhalb von 250 Ω transformiert. Das ist durch die Abmessungen bedingt, die DC-Zuleitungen sind zusammen mit den Antennenflügeln bei 100 GHz ungefähr $\lambda/4$ lang. Der Frequenzbereich von 250 GHz bis 350 GHz wird in den niederohmigen Impedanzbereich, mit einem von Realteil unter 25 Ω , transformiert. Ab 400 GHz fängt die Antennenstruktur an zu wirken und der Realteil der Impedanz bewegt sich in einem Bereich von 40 Ω bis 130 Ω . Die Aufweitung des Impedanzbereiches gegenüber einer idealen Antenne entsteht, weil die metallischen Elektroden des Transistors bei hohen Frequenzen nicht mehr vernachlässigbar klein gegenüber der Wellenlänge sind. Wenn die Frequenz weiter steigt, hat der GaN-HEMT einen immer größeren kapazitiven Einfluss, der schließlich dazu führt, dass das Drain-Gate Terminalkurzgeschlossen wird.

Die Simulation der Impedanz am Source-Gate-Terminal zeigt, dass der intendierte Kurzschluss nur bis etwa 1 THz auch real als Kurzschluss wirkt. Diese Transformation zu hohen

Impedanzen wird durch die Anschlussleitung des Gates zur unteren MIM-Elektrode hervorgerufen (siehe Detailbild in Abb. 5).

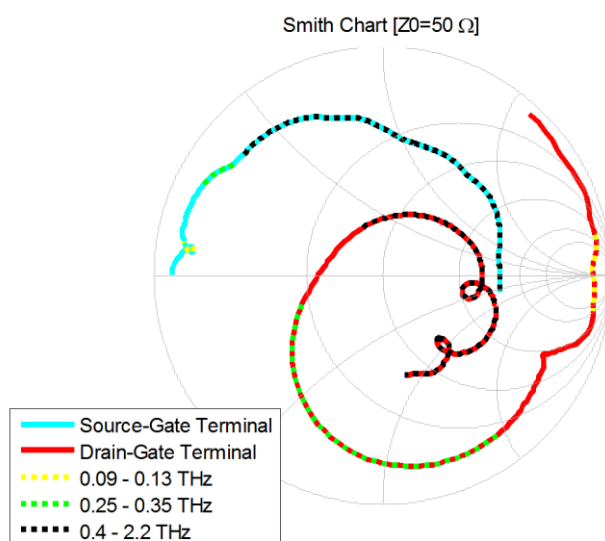


Abb. 7: 3D EM Simulation des Impedanzverlaufes des Source-Gate- und Drain-Gate-Terminals der Bow-Tie-Detektorstruktur im Frequenzbereich 0.05 ... 2.2 THz.

Die Bow-Tie-Antenne in Abb. 4 und Abb. 5 ist nur ein Beispiel verschiedener Antennenstrukturen, die entworfen und experimentell realisiert wurden. Allerdings konnten bisher die besten Ergebnisse in Bezug auf die Sensitivität mit dieser Antenne erzielt werden.

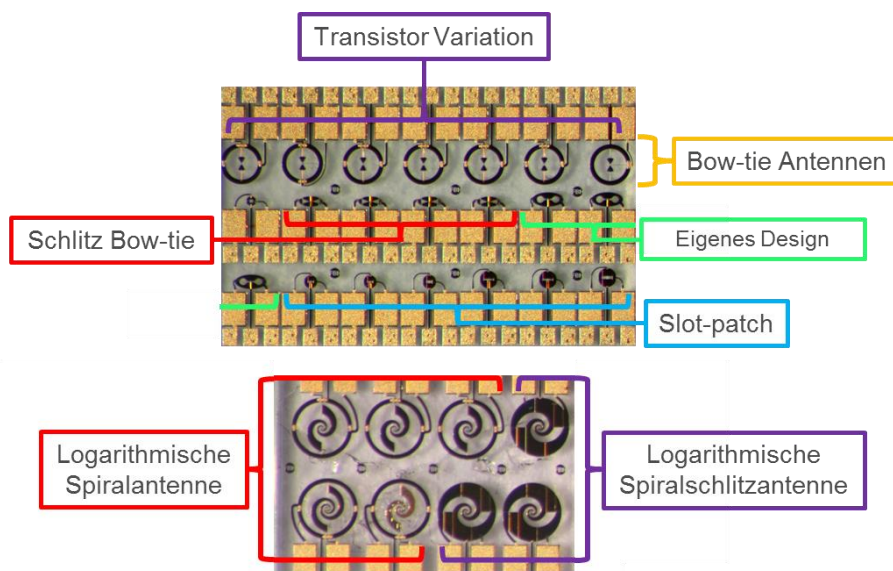


Abb. 8: Mikroskop-Bild der realisierten THz-Detektorstrukturen mit integrierten Antennenstrukturen.

Abb. 8 zeigt eine Übersicht über verschiedene realisierte Strukturen, die einen hohen Integrationsgrad der Detektorstruktur in die Antenne aufzeigen. Da es sich bei den Antennendesigns zum Teil um neuartige Ansätze handelt, ist zu erwarten, dass bei weiterer Optimierung dieser Strukturen verbesserte Ergebnisse in Bezug auf Breitbandigkeit und Sensitivität erzielt werden können. Insbesondere die Slot-Antennenstrukturen zeichnen sich durch sehr

hohe Kompaktheit aus, was die Dichte der Arrayelemente in einem Array erhöht und einen verbesserten Breitbandbetrieb verspricht.

3.3 Messergebnisse

Die Sensitivität der THz-Detektoren ist von der Gate-Spannung abhängig. Abb. 9 zeigt einen charakteristischen Verlauf des Detektorstroms, gemessen bei 500 GHz, als Funktion der Gate-Spannung. Dieses Verhalten entsteht durch die Abhängigkeit des Kanalleitwertes und der Steilheit des GaN HEMT von der Gate-Spannung. Im rechten Teilbild von Abb. 9 ist die gemessene optische Noise-Equivalent Power (NEP) eines THz-Detektors aufgetragen. Diese Messung wurde mit einem Photomischersystem durchgeführt, welches den gesamten Frequenzbereich von 0.1 bis 1.2 THz abdeckt. Die vermessene THz-Detektorstruktur verwendet als Epitaxie die $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}/\text{GaN}$ – Heterostruktur und den oben gezeigten GaN HEMT mit dem Bow-Tie-Antennendesign.

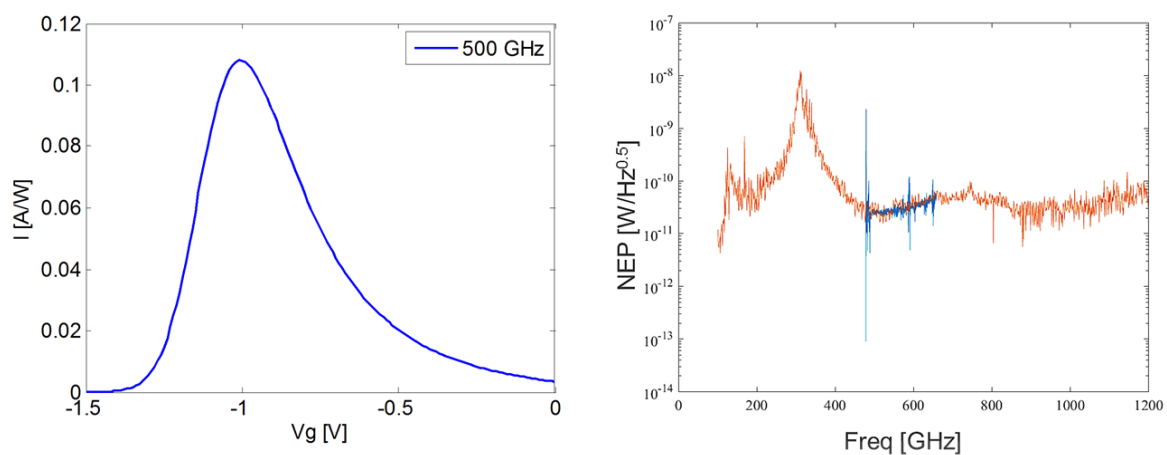


Abb. 9: Messungen des Detektorstroms bei 500 GHz über der Gate-Spannung (links) und der optischen äquivalenten Rauschleistung (NEP) eines THz-Detektors bei der optimalen Gate-Spannung (rechts).

Die NEP-Werte wurden dabei mittels der gesamten abgegebenen THz-Strahlleistung und ohne Berücksichtigung von Linsen- und Antennen-Verlusten bestimmt, was die Werte noch verbessern würde. Ab der unteren Designfrequenz von 400 GHz sieht man einen flachen Verlauf der NEP, mit einem Bestwert von $\sim 26 \text{ pW/Hz}^{0.5}$. Unterhalb von 400 GHz sind zwei Extremwerte bei 100 GHz und 300 GHz zu beobachten. Diese Extremwerte finden sich auch in der elektromagnetischen Simulation wieder (vgl. Abb. 7).

Das Extremum bei 300 GHz wird durch die Fehlanpassung zwischen der Antennenstruktur und dem GaN-HEMT-Kanal hervorgerufen, wodurch nur wenig THz-Leistung in den Kanal eingekoppelt werden kann. Bei 100 GHz ist durch die hohe Impedanz am Drain-Gate-Terminal die Anpassung zwischen Kanal und Antennenstruktur sehr gut, dadurch erhalten wir eine besonders hohe Sensitivität. Allerdings ist das Fernfeld der Antenne in diesem Frequenzbereich ungerichtet. Die blaue Kurve in Abb. 9 wurde mittels einer schmalbandigen elektronischen Quelle gemessen, um die optischen Ergebnisse für NEP zu validieren.

Die erreichten NEP-Werte verbessern den Stand der Technik beim Materialsystem GaN um den Faktor 5. Sie sind konkurrenzfähig mit den besten vergleichbaren Detektorkonzepten (Schottky-Dioden, Silizium-basierte Detektoren), die etwas bessere Werte erreichen, jedoch nur schmalbandig. Die GaN-Detektoren sind zudem robust gegen Übersteuerung durch hohe Strahlungsintensitäten und gegen ESD.

3.4 Neue Antennenstrukturen

Zur Verkleinerung der Größe der THz-Detektorstrukturen und um den Kurzschluss am Source-Gate-Terminal leichter realisieren zu können, wurden THz-Detektoren mit einer Schlitzantennenstruktur entwickelt. Dabei bilden die Gate- und die Drain-Elektrode die Antennenstruktur aus. Die Source-Elektrode wird von der Gate-Elektrode umschlossen, um mit der darüber liegenden Metallisierungslage einen MIM-Kondensator zu bilden, wie in Abb. 10 veranschaulicht.

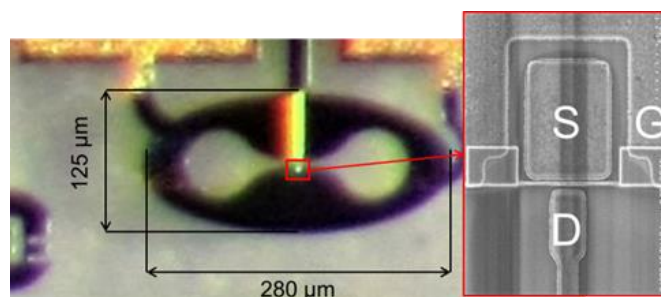


Abb. 10: Mikroskop-Bild einer Schlitzantennenstruktur mit Detailbild des Transistorlayouts.

Der Rand der THz-Detektorstruktur stellt ab 100 GHz die HF-Masse da, dadurch entfällt die Notwendigkeit eines gesonderten Masse-Rings, um das Übersprechen zu Nachbarstrukturen zu vermeiden. Dieses grundlegende Design-Schema befindet sich momentan im Patentierungsverfahren [14]. In diesem THz-Detektor verschmelzen GaN-HEMT und Antennenstruktur vollständig zu einer funktionalen Einheit.

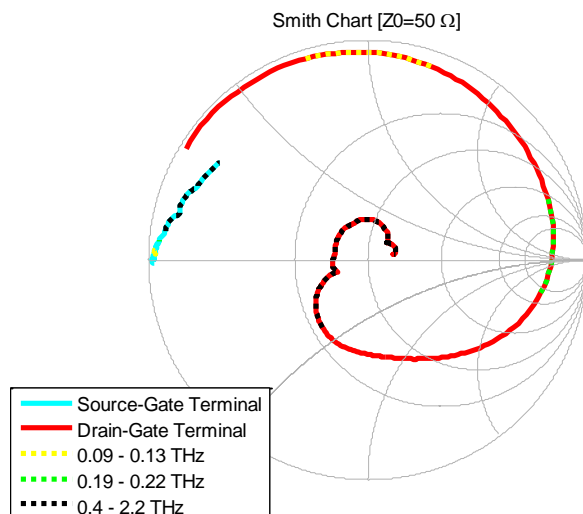


Abb.11: 3D EM Simulation des Reflexionsfaktors des Source-Gate und Drain-Gate Terminals der Schlitzantenne mit THz-Detektorstruktur aus Abb. 10 im Frequenzbereich von 0.05 – 2.2 THz.

Abb. 11 zeigt die 3D EM-Simulation der Schlitzantennen-Detektorstruktur. Der Kurzschluss am Source-Gate-Terminal ist im gesamten Frequenzbereich sehr gut realisiert. Am Drain-Gate-Terminal wird im Frequenzbereich von 190 GHz bis 220 GHz der Kurzschluss in den hochohmigen Impedanzbereich mit einem Realteil von über 100 Ω transformiert. Ab 400 GHz beginnt die Antennenstruktur zu wirken und der Realteil der Impedanz bewegt sich in einem Bereich von 30 Ω bis 65 Ω.

Bei der Realisierung dieses Detektors wurde die $\text{Al}_{0.22}\text{GaN}_{0.78}/\text{GaN}$ -Heterostruktur als Epitaxie verwendet. Die gemessenen optischen NEP-Werte sind in Abb. 12 aufgetragen. Sie zeigen ab 200 GHz einen flachen Verlauf. Die NEP wurde hier mittels einer Leistungsmessung an einigen Stützstellen berechnet, dadurch hebt sich die Wasserspektrallinie bei 558 GHz aus der Messung des Spektrums heraus. Mit einer minimalen NEP von $\sim 60 \text{ pW/Hz}^{0.5}$ erreicht die Schlitzantenne nicht ganz die Sensitivität der Bow-Tie-Struktur. Diese Diskrepanz kommt einerseits durch die unterschiedliche Epitaxie und andererseits durch den niedrigeren Realteil der Antennenfußpunktimpedanz der Schlitzantennenstruktur, wodurch sich eine größere Fehlanpassung zwischen HEMT-Kanal und Antennenstruktur ergibt. Dies soll in zukünftigen Design-Zyklen noch optimiert werden.

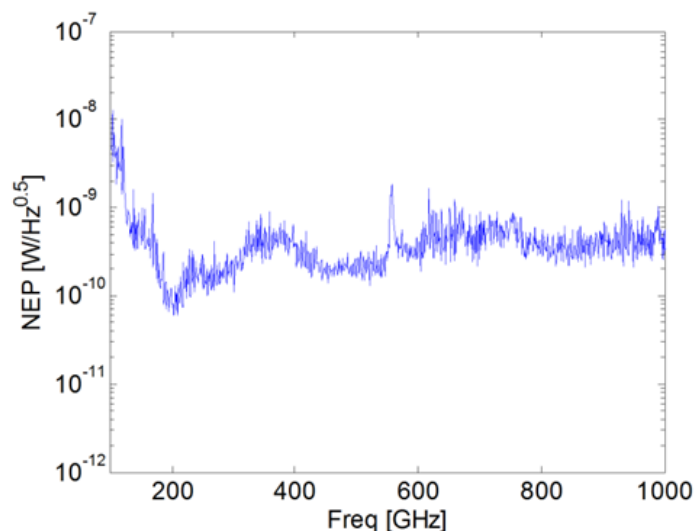


Abb.12: Optische NEP der Schlitzantennen-Struktur aus Abb. 10 als Funktion der Frequenz.

3.5 Weitere Erkenntnisse zum Detektorverhalten

Die Messungen an den realisierten Detektoren haben darüber hinaus auch neue Erkenntnisse zum Funktionsmechanismus ergeben. Diese besagen, dass der thermoelektrische Effekt in GaN einen zusätzlichen Beitrag zur Gleichrichtung des THz-Signals bewirkt. Die Messungen zur Responsivität der AlGaIn/GaN-Detektoren weisen neben dem Dyakonov-Shur-Mechanismus auf einen zusätzlichen Beitrag zur Gleichrichtung hin. Dies wurde bei der Bestimmung der Gate-Spannungsabhängigkeit der Strom-Responsivität offensichtlich, wie Abb. 13 für Strahlungsfrequenzen von 150 GHz bis 1.18 THz zeigt.

Auffallend ist der Wechsel des Vorzeichens bei Gate-Spannungen um -1.2 V , der durch den Dyakonov-Shur-Mechanismus nicht erklärt werden kann. Dagegen führt die Annahme eines durch asymmetrische Erwärmung des Transistors entstehendes Potentialgefälle zu einer Erklärung dieses Verhaltens. Im Rahmen der Dissertation von M. Bauer wurde ein theoretisches Modell entwickelt, bei dem der einschlägigen Literatur folgend davon ausgegangen wird, dass zur thermoelektrischen Spannung primär die Aufheizung der Ladungsträger beiträgt und die Erwärmung des Kristallgitters kaum eine Rolle spielt („Hot-Carrier Thermoelectric Effect“ gegenüber klassischem Seebeck-Effekt). Die für den Aufbau der Thermospannung notwendige unterschiedliche Aufheizung auf der Source- und Drain-Seite ergibt sich aufgrund des Hochfrequenzkurzschlusses des Source- und Gate-Kontakts, den man für die Ausnutzung des Dyakonov-Shur-Effekts benötigt und der zu einer wesentlichen THz-Leistungseinkopplung nur von der Drain-Seite führt.

Mit diesem Modell kann man den Vorzeichenwechsel und die Frequenzabhängigkeit des Zusatzeffekts vorhersagen. Interessanterweise ergeben die Simulationen, dass die Thermospannung im Bereich des Signalmaximums das gleiche Vorzeichen haben und damit konstruktiv zu einem höheren Gesamtsignal beitragen kann. Dies eröffnet eine Möglichkeit zur weiteren Optimierung der Responsivität der Detektoren.

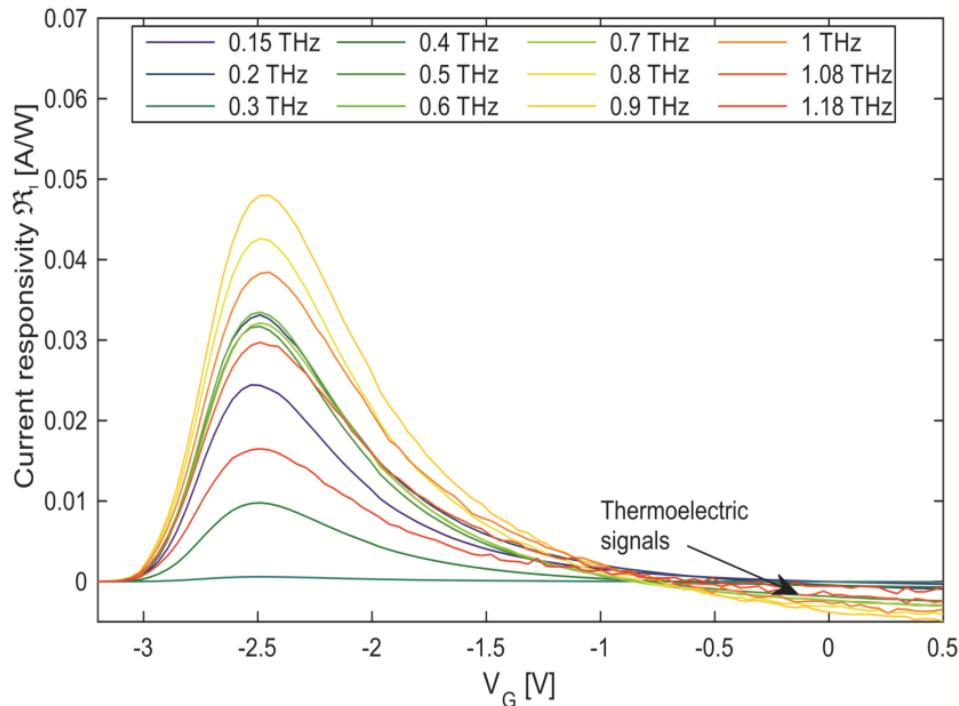


Abb. 13: Strom-Responsivität eines AlGaIn/GaN-Detektors mit Bow-Tie-Antenne (aus [13]).

3.6 Detektion von Pulsen

Die realisierten GaN-THz-Detektoren lassen sich auch für die Detektion ultrakurzer Pulse im fs-Bereich verwenden [3]. Die Bow-Tie-Detektoren wurden dazu mit einem fs-Laser angeregt und ihre Spannungsantwort sowie die Dynamik der THz-Detektoren gemessen. Abb. 14 zeigt die Spannungsantwort auf die THz Laserpulse bei verschiedenen Pulslängen als Funktion der Gate-Source-Spannung. Es zeigt sich, dass die THz Detektorstruktur mit Bow-Tie-Antenne beste Werte bei 25 fs Pulsen aufweist, wobei auch 18 fs Pulse noch sehr gute Spannungsantworten zeigen. Dabei wird eine Dynamik von größer 20 dB erzielt.

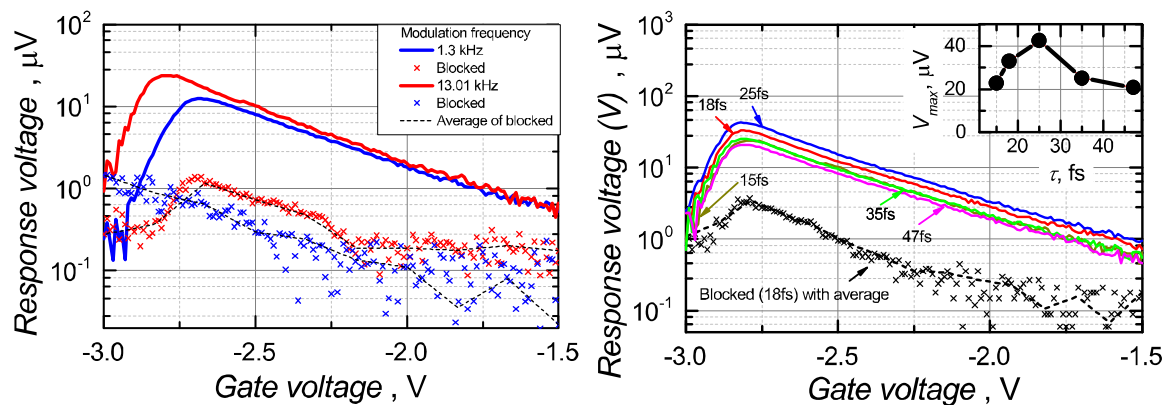


Abb. 14: Spannungsantwort des GaN-Detektors auf einen 15 fs THz Laserpuls (links) und für unterschiedliche Pulslängen (rechts) als Funktion der Gate-Source-Spannung. Die Kreuze zeigen die Impulsantwort bei blockiertem THz-Signal, die durchgehenden Linien das Ergebnis bei angelegten THz-Signalen mit 1.3 und 13.01 kHz Modulationsfrequenz.

4 THz-Kamera

Auf Basis der THz-Detektorstruktur wurden 2D-THz-Detektorarrays mit 12 x 12 Pixel realisiert. Hierfür wurde die THz-Detektorstruktur mit der höchsten Prozessstabilität ausgewählt, um den Yield zu optimieren, was angesichts der relativ hohen Anzahl von 144 Elementen und des fehlenden Reifegrads des modifizierten Prozesses eine beachtliche Herausforderung darstellte. Dem entsprechend wurde eine Bow-Tie-Antennenstruktur in Kombination mit einem GaN-HEMT mit 200 nm Gate-Länge und 320 nm breitem Gate-Kopf verwendet. Die Detektor-Elemente besitzen einen äquidistanten Abstand von 380 μm zu ihren Nachbarstrukturen.

Das 12 x 12 Pixel Array wurde in 4 Quadranten von je 6 x 6 Pixel aufgeteilt, die parallel adressiert werden können. Bei einer festen Bildrate erhöht sich damit die Integrationszeit pro Pixel gegenüber einem sequenziellen Auslesen des gesamten 12 x 12 Arrays. In Abb. 15 sind die schematische Verschaltung der THz-Detektorstrukturen und die Mikroskopfotografie eines Quadranten dargestellt.

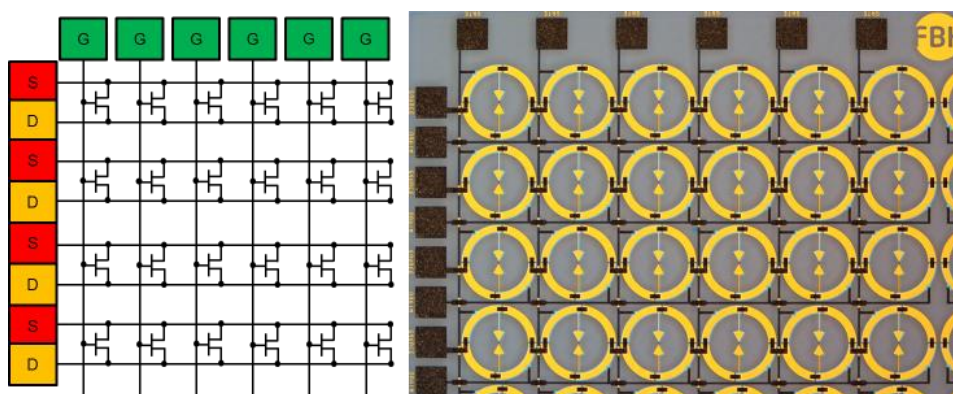


Abb. 15: Schematische Verschaltung des 2D-THz-Detektorarrays (links) und Ausschnitt eines gefertigten 2D-THz-Detektorarrays (rechts).

Alle Drain- und Source-Kontakte einer Zeile und die Gate-Kontakte einer Spalte werden parallelgeschaltet. Da die Empfindlichkeit der THz-Detektoren von der Gate-Spannung abhängig ist (vgl. Abb. 9) und diese durch eine hohe negative Gate-Spannung hochohmig geschaltet werden können, ist es möglich, nur eine einzelne THz-Detektorstruktur pro Zeile einzuschalten und dann diese aktive Spalte parallel auszulesen.

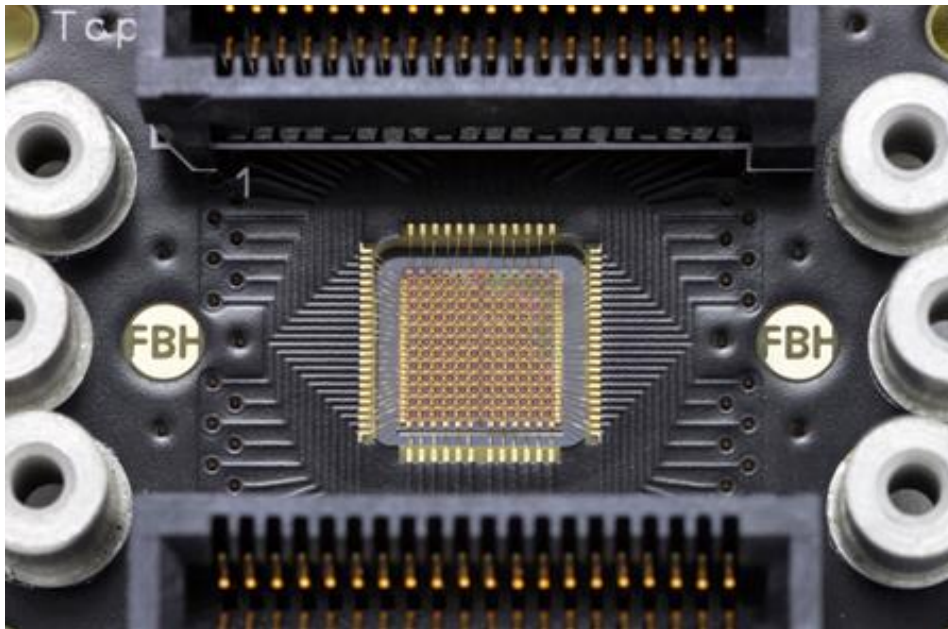


Abb. 16: Aufgebautes Kameramodul mit 12x12 Pixel.

Das Detektor-Array wurde zusammen mit der Ausleseelektronik zu einer THz-Kamera aufgebaut. Das Kernstück der Kamera ist das Sensormodul, das in Abb. 16 gezeigt ist. Der Aufbau ist so gewählt, dass durch die Verwendung von Kartenrandsteckern das Modul leicht mit unterschiedlicher Ausleseelektronik kombiniert werden kann. In dem Modul können alle Pixel einer einzelnen Zeile oder Spalte gleichzeitig ausgelesen werden. Das Auslesen der gesamten Bildinformation erfolgt dann zeilenweise durch Umschalten. Bei der Inbetriebnahme der Kamera hat sich gezeigt, dass die Ausleseelektronik durch das Umschalten der Zeilen ein starkes Rauschsignal erzeugt, das das detektierte Bildsignal überdeckt. Prinzipiell wurde jedoch der Kamerabetrieb in Echtzeit nachgewiesen.

Derzeit wird neben der Verbesserung der Ausleseelektronik auch an der optischen Abbildung gearbeitet, um den Einsatz der THz Kamera praxistauglicher zu gestalten.

Neben den für die Kamera verwendeten Arrays mit Bow-Tie-Detektoren wurden auch schmalbandige Arrays entwickelt. Abb. 18 zeigt eine solche Struktur, die auf Schlitzantennen beruht. Dieser Ansatz wurde aber im Rahmen des Vorhabens für die Kamera-Realisierung nicht weiterverfolgt, da das Alleinstellungsmerkmal der GaN-HEMT-basierten THz-Detektoren die Breitbandigkeit ist.

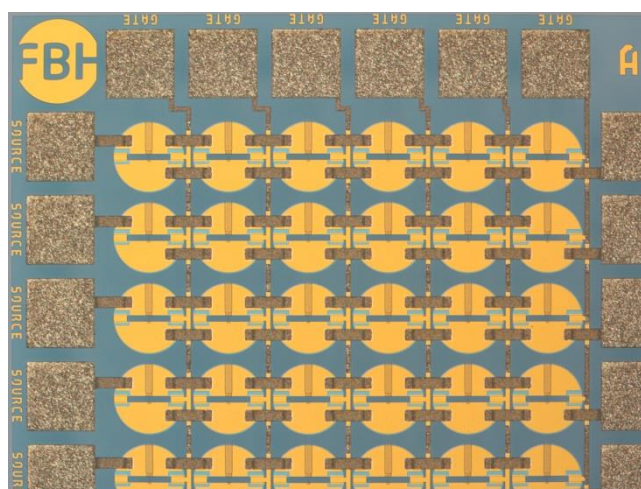


Abb. 18: Schmalbandiges 2D THz-Detektorarray aus Schlitzantennen THz-Detektorstrukturen

5 Kooperationen

Die realisierten GaN-Detektoren wurden im Rahmen von mehreren Kooperationen Partnern zur Verfügung gestellt, um ein Benchmarking zu ermöglichen, die Ergebnisse für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten zu nutzen und die Praxistauglichkeit zu testen.

Die aktivste Kooperation erfolgte im Rahmen des FP7 EU-Projektes HYPERIAS (Hyper-Spectral Imaging and Sensing in the THz Frequency Range, 03/2013-02/2017) mit der schottischen Laserfirma MSquared Lasers, Glasgow. Forscher von GUF führten dort mit Al-GaN/GaN-Detektoren erfolgreich Messungen mit abstimmbaren THz-Quasi-Dauerstrich-Pulsen (0.7-1.1 THz) durch. Herausfordernd war die besondere Strahlungsquelle auf Basis eines OPO mit besonders niedriger Pulswiederholrate und hoher Spitzenleistung. Ergebnisse sind in [1,6] veröffentlicht.

Ein Partner dieser Kooperation war auch die Gruppe von Prof. Dr. P. Haring Bolivar, bei dem sich weiterhin ein Detektor für Anwendungstests mit THz-Strahlung aus Photomischern befindet. Ein weiterer Detektor wurde der Gruppe von Prof. Dr. Rainer Leonhardt, University of Auckland, zur Verfügung gestellt, mit dem das GUF-Team im Kontext der Atemanalyse zusammenarbeitet. Außerdem wurde ein Detektortest im Team von Prof. Dr. J. Stake, Chalmers University, durchgeführt.

Als generelles Ergebnis der Arbeiten im Rahmen der Kooperationen erweist sich, dass die GaN-Detektoren ungewöhnlich robust gegen elektromagnetischen Schock und nicht zuletzt deshalb leicht handzuhaben sind und eine geringe Ausfallwahrscheinlichkeit aufweisen. Ihre höchste Messempfindlichkeit haben sie bei Frequenzen um und unter 1 THz, wo ihre Kenndaten vergleichbar mit denen von Si-CMOS-TeraFET-Detektoren sind, die allerdings empfindlicher auf elektrostatische Störungen reagieren.

6 Wissenschaftlich-technische Highlights

Die Ergebnisse im TSPiG-Projekt erfüllen bzw. übertreffen die zentralen im Antrag formulierten Ziele. Die wichtigsten Errungenschaften sind im Folgenden zusammengefasst:

- Die im Projekt entwickelten GaN-Detektoren zeichnen sich durch neue Ansätze zu den Antennen und zur Integration der Transistoren in die Antennenstruktur aus, was die Verluste durch Einkopplung und Verbindungsstrukturen reduziert.
- Die GaN-Detektoren erreichen internationale Bestwerte bei der Sensitivität (NEP) für dieses Material, mit einer Verbesserung um den Faktor 5 im Vergleich zum bisherigen Stand der Technik. Diese NEP-Werte sind vergleichbar mit den besten konkurrierenden Detektorkonzepten (Schottky-Dioden, Silizium-basierte Detektoren), die GaN-Detektoren sind zudem robust gegen Übersteuerung durch hohe Strahlungsintensitäten und gegen ESD.
- Die Integrationsfähigkeit der Detektoren und die Realisierbarkeit einer THz-Kamera für Materialprüfungs-Anwendungen wurden anhand eines Arrays mit 144 Elementen erfolgreich demonstriert.
- Die Charakterisierung der realisierten Detektorstrukturen ergab zudem interessante wissenschaftliche Erkenntnisse über die Wirkung des thermoelektrischen Effekts in plasmonischen Detektoren sowie zur Möglichkeit der Detektion von fs-Pulsen [2].
- Die Ergebnisse wurden in bisher 11 wiss. Publikationen und Konferenzbeiträgen veröffentlicht, davon 3 in begutachteten Fachzeitschriften und 5 auf renommierten Fachkonferenzen. Ein Patent wurde angemeldet, um das erreichte IP zu schützen.

7 Verwertung und weiterführende Arbeiten

7.1 Wirtschaftliche Verwertung

Mit den realisierten Array-Strukturen für eine THz-Kamera ist bereits ein wesentlicher Schritt in Richtung auf eine anwender-orientierte Nutzung erreicht worden. Um das IP zu schützen, wurde deshalb ein Patent zur Detektor-Struktur mit der innovativen Integration von Transistor und Antennen eingereicht (DRN: 2017022309511200DE, Erfinder: Adam Rämer, Sergey Shevchenko). Zur Weiterführung der Arbeiten in Richtung auf die Anwendung wird gerade ein Projektantrag im Rahmen des VIP+ Programms des BMBF ("Validierung des technologischen und gesellschaftlichen Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung") vorbereitet.

7.2 Weiterführende wissenschaftliche Arbeiten

Aus wissenschaftlicher Sicht sind folgende weiterführenden Arbeiten interessant oder werden bereits verfolgt:

- Kohärente Detektion, z.B. Gasspektroskopie. Im Rahmen einer Doktorarbeit, angesiedelt im EU-geförderten Innovative Training Network CELTA (Convergence of Electronics and Photonics Technologies for Enabling Terahertz Applications) erfolgt an der GUF die Weiterentwicklung heterodyner Messtechniken mit AlGaIn/GaN-Detektoren des FBH. Ziel ist u.a. die Verwendung solcher Detektoren für die Gassensorik, wobei die Heterodyn-Messtechnik einerseits die Sensitivität von aktiven Messsystemen erhöht, aber es andererseits auch möglich erscheint, eine passive substanzspezifische Detektion unter Ausnutzung der Wärmestrahlung der molekularen Spezies zu erreichen.
- Zeilen-Arrays für Zeilenscanner, Qualitätskontrolle. Aufbauend auf den bei MSquared erzielten Ergebnissen wäre der nächste Schritt der Aufbau einer Detektorzeile mit passender Optik, um daraus einen Scanner für die Qualitätssicherung herzustellen. Die Leistung des THz-Strahls ist für Multipixel-Betrieb ausreichend, weitere Maßnah-

men zur Signalnormierung und Rauschunterdrückung wären aber vorzunehmen, da die Leistungsfluktuationen der OPO-Signalquelle und das Rauschen aufgrund der Güteschaltung des Lasers die Leistungsdaten des Mess-Systems stark beeinträchtigen. Gegenwärtig ist für MSquared eine solche Scanner-Entwicklung nachrangig.

- **Tiefemperatur-Detektion.** Eine drastische Steigerung der Messempfindlichkeit der AlGaIn/GaN-Detektoren ist wie auch bei TeraFETs anderer Materialsysteme durch den Detektorbetrieb bei tiefen Temperaturen möglich. Ein überraschender Befund aus der Literatur ist jedoch, dass die Leistungsverbesserung mit sinkender Temperatur schneller sättigt als bei anderen Materialsystemen. Dieser Befund soll durch eigene Messungen in Zukunft noch überprüft und, wenn er sich bestätigt, die Ursache hierfür gefunden werden.
- **Fourier-Bildgebung 3D:** Die GUF-Gruppe hat ein Projekt zur 3D-Bildgebung begonnen, bei dem kohärente Detektion mit einem 2D-Detektorarray in der Brennebene des Abbildungssystems erfolgt. Das dreidimensionale Bild wird numerisch aus den aufgezeichneten Amplituden- und Phasendaten rekonstruiert. Diese Vorgehensweise ist gut an die Eigenschaften von THz-Detektorarrays angepasst, da deren Pixelzahl, begründet durch die große Wellenlänge, viel kleiner ist als die von Detektorarrays für das Sichtbare. Fourier-Techniken erlauben es dennoch, auch unter solchen Bedingungen ein großes Gesichtsfeld zu erfassen. Weil auch kohärente Messungen bei THz-Frequenzen vergleichsweise leicht vorzunehmen sind, ist die Erzeugung von 3D-Bildern naheliegend.
- **Weitere Untersuchungen thermoelektrischer Effekt:** Die Beobachtung eines thermoelektrischen Signalbeitrags wird in Zukunft Anlass sein, diesen bei der Optimierung der Detektoren mit zu berücksichtigen. Hier hilft das Ergebnis neuerer Untersuchungen, die darauf hindeuten, dass die resistive und die thermoelektrische Gleichrichtung im Bereich des Maximizeffekts mit gleichem Vorzeichen, also additiv und nicht subtraktiv beitragen. Durch geeignete Wahl der Elektrodenformen im Kanalbereich des Transistors sollte sich die Gesamtsensitivität steigern lassen.

7.3 Qualifikationsarbeiten

Die Ergebnisse des Projektes bilden die maßgebliche Grundlage für zwei Dissertationen:

FBH: Adam Rämer, "THz-Detektion und –Emission mittels plasmonischer Komponenten", in Vorbereitung

GUF: Maris Bauer, "Hydrodynamic modeling and experimental characterization of the plasmonic and thermoelectric terahertz response of field-effect transistors with integrated broadband antennas in AlGaIn/GaN HEMTs and CVD-grown graphene", bei der GUF eingereicht.

8 Literatur

8.1 Projekt-Publikationen (erschienen)

Diese Liste enthält die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Publikationen, die derzeit (10/2017) im Internet zugänglich sind. Weitere Publikationen sind in Vorbereitung.

- [1] D. Voß, W. Zouaghi, M. Jamshidifar, S. Boppel, C. Mc'Donnel, J. R. P. Bain, N. Hempler, G. P. A. Malcolm, G. T. Maker, M. Bauer, A. Lisauskas, A. Rämer, S. A. Shevchenko, W. Heinrich, V. Krozer, and H. G. Roskos, "Imaging and spectroscopic sensing with low-repetition-rate terahertz pulses and GaN TeraFET detectors," accepted for publication in *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, DOI: 10.1007/s10762-017-0447-1.
- [2] K. Ikamas, A. Lisauskas, M. Bauer, A. Rämer, S. Massabeau, D. Čibiraitė, M. Burakevič, S. Chevtchenko, J. Mangeney, W. Heinrich, and others, "Efficient detection of short-

- pulse THz radiation with field effect transistors,” in *Noise and Fluctuations (ICNF), 2017 International Conference on*, 2017, pp. 1–4.
- [3] D. Čibiraitė, M. Bauer, A. Rämmer, S. Chevtchenko, A. Lisauskas, J. Matukas, V. Krozer, W. Heinrich, and H. G. Roskos, Enhanced performance of AlGa_N/Ga_N HEMT-based THz detectors at room temperature and at low temperature, *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2017 42nd International Conference on*, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2017.8067118.
- [4] D. Cibiraite, M. Bauer, A. Lisauskas, V. Krozer, H. G. Roskos, A. Rämmer, W. Heinrich, S. Pralgauskaite, J. Zdanevicius, J. Matukas, and others, “Thermal noise-limited sensitivity of FET-based terahertz detectors,” in *Noise and Fluctuations (ICNF), 2017 International Conference on*, 2017, pp. 1–4.
- [5] A. Lisauskas, A. Rämmer, M. Burakevic, V. Krozer, W. Heinrich, and H. G. Roskos, Terahertz emission from large AlGa_N/Ga_N field-effect transistors, *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2016 41nd International Conference on*, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758975.
- [6] W. Zouaghi, D. Voß, C. McDonnell, D. Mundy, J. R. P. Bain, N. Hempler, G. P. Malcolm, G. T. Maker, A. Rämmer, S. A. Chevtchenko, W. Heinrich, V. Krozer, and H. G. Roskos, Real-time detection of the THz pulses from a THz OPO using AlGa_N/Ga_N TeraFETs, *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2016 41nd International Conference on*, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758406.
- [7] M. Bauer, S. Boppel, J. Zhang, A. Rämmer, S. Chevtchenko, A. Lisauskas, W. Heinrich, V. Krozer, and H. G. Roskos, “Optimization of the Design of Terahertz Detectors Based on Si CMOS and AlGa_N/Ga_N Field-Effect Transistors,” *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol. 25, no. 03n04, p. 1640013, Sep. 2016.
- [8] S. Boppel, M. Ragauskas, A. Hajo, M. Bauer, A. Lisauskas, S. Chevtchenko, A. Ramer, I. Kasalynas, G. Valusis, H.-J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, V. Krozer, and H. G. Roskos, “0.25- Ga_N TeraFETs Optimized as THz Power Detectors and Intensity-Gradient Sensors,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 348–350, Mar. 2016.
- [9] M. Bauer, A. Rämmer, S. Boppel, S. Chevtchenko, A. Lisauskas, W. Heinrich, V. Krozer, and H. G. Roskos, “High-sensitivity wideband THz detectors based on Ga_N HEMTs with integrated bow-tie antennas,” in *Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 2015 10th European*, 2015, pp. 1–4.
- [10] A. Lisauskas, M. Bauer, A. Rämmer, K. Ikamas, J. Matukas, S. Chevtchenko, W. Heinrich, V. Krozer, and H. G. Roskos, “Terahertz rectification by plasmons and hot carriers in gated 2D electron gases,” in *Noise and Fluctuations (ICNF), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 1–5.
- [11] S. Boppel, M. Ragauskas, A. Hajo, M. Bauer, A. Lisauskas, S. Chevtchenko, A. Rämmer, I. Kašalynas, G. Valušis, J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, V. Krozer, and H. G. Roskos, Terahertz edge detection with antenna-coupled field-effect transistors in 0.25 μm AlGa_N/Ga_N technology, *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2014 39th International Conference on*, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2014.6956066.

8.2 Projekt-Publikationen (in Vorbereitung)

- [12] M. Bauer, A. Rämer, S. Chevtchenko, K. Osipov, D. Čibiraitė, S. Pralgauskaitė, A. Lisauskas, W. Heinrich, V. Krozer, and H. G. Roskos, "A high-sensitivity AlGaIn/GaN HEMT Terahertz Detector with Integrated Broadband Bow-tie Antenna," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, (to be submitted).
- [13] Maris Bauer, "Hydrodynamic modeling and experimental characterization of the plasmonic and thermoelectric terahertz response of field-effect transistors with integrated broadband antennas in AlGaIn/GaN HEMTs and CVD-grown graphene", bei der Goethe-Universität Frankfurt eingereichte Dissertation.

8.3 Patente

- [14] Patent (eingereicht): DRN: 2017022309511200DE, Erfinder: Adam Rämer, Sergey Shevtchenko