



innovations  
for high  
performance  

---

microelectronics

**Schlussbericht zum Verbundprojekt:**

**Abhörsichere, schaltbare und integrierbare SAW-Funkmodule**

**Teilprojekt: Integrierte (Bi)CMOS-ICs**

**Ausführende Stelle: IHP – Leibniz-Institut für innovative  
Mikroelektronik**

**FKZ: 13N9891**

**Projektleiter des Teilvorhabens: Dr. habil. Christian Wenger**

## **I. Kurze Darstellung zu**

### **1. Aufgabenstellung**

Das Verbundprojektes „SAW-Funkmodul“ hat als Ziel eine grundsätzliche Untersuchung zur technischen Realisierbarkeit von (Bi)CMOS kompatiblen On-Chip-Oberflächenwellen-Filtern. Für die Produktion der Oberflächenwellen-Filter wird ein Prozess zur Herstellung von piezoelektrischen Zinkoxid (ZnO)-und Aluminiumnitrid(AIN)-Schichten auf (Bi)CMOS-Schaltungen entwickelt. Dies eröffnet die Möglichkeit, SAW-Filter und -Resonatoren mit (Bi)CMOS-Bauelementen zu verbinden, um schaltbare Filterstrukturen zu erhalten. Neben der Möglichkeit zur kostengünstigen Massenproduktion, ermöglichen (Bi)CMOS-kompatible Herstellungsverfahren die monolithische Integration der Bauelemente, sowie eine Verbesserung der Eigenschaften der Filter-Elemente.

In diesem Zusammenhang liegt die Aufgabe des Paul-Drude-Instituts für Festkörperelektronik (PDI, Teilprojekt „ZnO/AIN-Sputtertechnologie“) bei der Entwicklung von piezoelektrischen Schichten, die sowohl auf glatten als auch auf mit Metallfingern und mikroelektronischen Steuerelementen belegten Substraten aufgebracht werden. Strukturierte Fingerelektroden werden beim Partner IHP (Institut für innovative Mikroelektronik) abgeschieden, strukturiert und mittels Chemisch-Mechanischen-Polierens (CMP) geglättet. Als piezoelektrisch aktive Dünnschichten wurden am PDI polykristalline Zinkoxid- (ZnO), Aluminiumnitrid- (AIN-) Schichten sowie ZnO/SiO<sub>2</sub> und AIN/SiO<sub>2</sub>-Schichtstrukturen abgeschieden. Dafür wird ein Nieder-Temperatur-Sputterverfahren (<400°) angewendet, das Schichten mit guten piezoelektrischen Eigenschaften liefert.

### **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Projekt hatte eine Laufzeit von 3 Jahren und einer genehmigten Verlängerung von 3 Monaten (01.10.2008 – 31.12.2011). Das Volumen des Teilprojektes „Integrierte (Bi)CMOS-ICs“ betrug 330.100,- Euro. Davon entfielen

227.500,- Euro für Personalausgaben

93.600,- Euro für allgemeine Verwaltungsausgaben

9.000,- Euro für Dienstreisen

Für die Durchführung des Projektes erwies es sich als außerordentlich hilfreich, die langjährige Kompetenz der Abteilungen „Materials Research“ und „Circuit Design“ des IHPs auf dem Gebiet der Dielektrika nutzen zu können. Zu den Abteilungen gehörten zum Beginn des Vorhabens ca. 30 Experten auf diesem Gebiet an, deren Expertise durch zahlreiche Publikationen und erfolgreiche Durchführungen von Projekten gezeigt wurde:

In enger Zusammenarbeit mit der Technologie-, der Schaltkreis- und der Systemdesignabteilung konzentrieren sich die Wissenschaftler der Materialforschung auf das Identifizieren, Bewerten und Optimieren komplexer Materialsysteme, die das Potential

besitzen, elegante Lösungen für aktuelle Materialprobleme in der Mikroelektronik zu bieten. Heutzutage vollzieht die Industrie den schwierigen Übergang von der Mikro- hin zur Nanoelektronik, bei dem künftige Leistungszuwächse elektronischer Schaltkreise neben der weiteren Miniaturisierung in verstärktem Maße durch die Integration neuer Materialien erzielt werden. Folglich befindet sich die Materialforschung zum gegenwärtigen Zeitpunkt in einer spannenden Periode, in der sie substantielle Beiträge zur Entwicklung zukünftiger Technologiezweige in der integrierten Schaltungstechnologie liefern kann.

Sämtliche Forschungsaktivitäten der Abteilung System-Design basieren auf dem Forschungsprogramm „Drahtloses Internet: Systeme und Anwendungen“.

Dieses Programm hat die Untersuchung und Entwicklung komplexer Systeme für das drahtlose Internet in Form von Prototypen und Anwendungen zum Inhalt. Ziel sind Hardware/Software-Systemlösungen auf hochintegrierten Single-Chips. Der vertikale Forschungsansatz zeigt sich auch in der Architektur der erarbeiteten Systeme. Im Wesentlichen wird die Wechselwirkung zwischen den Schichten optimiert und eine vertikale Migration semantischer Elemente realisiert.

Die Abteilung Schaltkreis-Design führt Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet siliziumbasierter Mikrowellenschaltungen bei Frequenzen bis zu 124 GHz durch.

Die Hauptforschungsschwerpunkte sind zur Zeit: RF-Komponenten und WLAN-Transceiver für 60 GHz und 5 GHz, Schaltungen für Autoradar (24 und 77 GHz), Ultrabreitband-Frontends mit geringer Leistungsaufnahme (3 bis 10 GHz), A/D- und D/A-Wandler und Leistungselektronik (integrierte Leistungsverstärker, Schalter und Leistungssteuerung) auf der Basis integrierter RF- LDMOS und HBTs.

### **3. Planung und Ablauf**

Aus dem Gesamtvorhaben des Verbundprojektes lassen sich acht Teilziele für das IHP extrahieren:

- Evaluierung und Schnittstellen-Definition für die hybride Lösung
- Integration der IDT-Strukturen in den Prozessablauf
- Schaltungsentwurf und Herstellungsprozess für hybride Module
- Inbetriebnahme und Test der Si-HW und SAW-Funktionen
- Evaluierung der AIN-Parameter für SAW-Anregung
- Kontaminationsstudien zur ZnO- und AIN-Integration
- Entwurf des Systemkonzepts eines integrierten Multi-Band-Moduls
- Prototyp eines integrierten SAW-Filters mit HF-Elektronik

Ausgehend von der Beschreibung des Gesamtvorhabens wurden die Anforderungen an ein hybrides System formuliert. Ein Konzept des 2.4-GHz-Front-Ends in dieser Umgebung wurde erarbeitet. Die darin einzubeziehenden Komponenten wurden festgelegt. Zudem sind die Schnittstellen des Front-Ends und deren Parameter zu definieren. Als Ergebnis lag in Zusammenarbeit mit dem Partner TeleBITcom eine Spezifikation der Hybridlösung vor.

Als nächstes wurde ein Herstellungsprozess entwickelt, in dem die piezoelektrischen Schichten auf ein mit Metallfingern belegtes Silizium Substrat aufgebracht wurden. Die strukturierten Fingerelektroden aus Wolfram wurden im IHP abgeschieden, strukturiert und mittels Chemisch-Mechanischen Polierens (CMP) geglättet. Hierzu war hohlraumfreies Abscheiden der Wolfram-basierten IDTs mittels Chemical Vapour Deposition (CVD) erforderlich. Die Optimierung des Chemisch-Mechanischen Polierens (CMP) war ein wichtiger Arbeitsschritt, um eine planare Oberfläche für die folgende Abscheidung der piezoelektrischen Schicht zu ermöglichen. Neben der Optimierung des Polierdrucks war auch eine angepasste Wolfram-Slurry mit speziellen chemischen Komponenten erforderlich.

Die abgeschiedenen Elektrodenschichten wurden umfassend strukturell analysiert. Als Charakterisierungsmethoden wurden Röntgenbeugung (XRD), Röntgenreflektion (XRR), Transmissions-Elektronen-Mikroskopie (TEM), Photoelektronenspektroskopie (XPS), Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM), Flugzeit-Sekundärionen-Massen-Spektrometrie (TOF-SIMS) und Auger-Elektronen-Spektroskopie (AES) angewandt.

Die für die Schaltungen zu verwendende Halbleitertechnologie des IHP wurde festgelegt. Auf Grundlage der vorgegebenen Spezifikation und den Schnittstellendefinitionen in Verbindung mit der gewählten Technologie wurden die Schaltungen des 268 MHz-Front-Ends entworfen, simuliert und layoutet. Die Bearbeitung der Siliziumscheiben erfolgte im IHP-Reinraum.

Nach der ersten Evaluierung erfolgten gegebenenfalls ein Redesign und ein erneuter Scheibenprozeßlauf.

Im nächsten Schritt wurde die Funktionalität der entwickelten Komponenten untersucht. Dazu wurden sowohl die notwendige Testumgebung festgelegt als auch die Testaufbauten entwickelt, hergestellt und in Betrieb genommen. Aus den Messergebnissen wurden Rückschlüsse für eine weitere Verbesserung der Front-End- und SAW-Komponenten gezogen.

Zeitgleich wurden die AlN-Schichtparameter für eine effiziente SAW-Anregung und Anpassung des AlN-Depositionsverfahrens für die Herstellung von piezoelektrischen Schichten auf strukturierten Substraten untersucht. Mit Hilfe des gewonnenen physikalischen und chemischen Verständnisses wurden die Abscheidebedingungen derart variiert, dass die Schichteigenschaften nach einigen Iterationen mit denen der von ZnO Schichten vergleichbar waren. Es wurden begleitende Kontaminationsstudien zu ZnO und AlN durchgeführt werden. Die Untersuchung der thermischen Stabilität von ZnO und AlN auf Silizium war der erste Arbeitsschritt. Die thermisch belasteten piezoelektrischen Schichten wurden anschließend umfassend strukturell analysiert.

Der Übergang von der Hybridlösung zur Teilintegration des HF-Front-Ends mit der SAW-Komponente ergab sich als nächster konsequenter Schritt. Im Mittelpunkt standen der Entwurf, die Simulation und das Layout einer solchen Anordnung.

Ein weiterer Schwerpunkt beinhaltete die Erstellung von Systemkonzepten für das Multi-Band-Modul. Insbesondere die Besonderheiten der unterschiedlichen Anforderungen, die sich aus den Frequenzbändern ergaben, wurden herauszuarbeiten. Die so entstandenen Konzepte mündeten in einen Vorschlag für eine Architektur eines Multi-Band-Transceivers.

Die Besonderheiten der Integration der piezoelektrischen Schichten (Strukturierung, Prozesstoleranz, Kontamination) wurden an Teststrukturen zusammen mit dem Projektpartner PDI untersucht. Die Untersuchung der Validität der Demonstrator-Bauelemente stand hierbei im Vordergrund. Durch elektrische Hochfrequenz-Testverfahren wurde die Performance der Bauelemente untersucht.

Begleitend wurden analytische Untersuchungen an ausgefallenen Bauelementen durchgeführt, um das Verständnis und die Optimierung der Strukturen zu fördern. Die extrahierten elektrischen und physikalischen Parameter wurden zur Optimierung der Abscheidebedingungen benötigt.

An ausgewählten Bauelementen wurden außerdem Hochfrequenzmessungen im GHz-Bereich durchgeführt, um Verluste bei diesen Frequenzen und damit die Einsatzmöglichkeiten der Bauelemente zu evaluieren.

#### **4. Wissenschaftlichen und technischen Stand, an dem angeknüpft wurde**

Oberflächenwellen (SAW, Surface Acoustic Waves) sind elastische Schwingungen, die sich entlang einer Oberfläche ausbreiten. SAWs mit Frequenzen von einigen MHz bis zum einigen GHz können mit Hilfe von IDTs auf einem piezoelektrischen Substrat erzeugt werden. Diese Elemente bestehen aus einem gitterförmigen metallischen Struktur (interdigital transducer, IDT), der auf einem kristallinen piezoelektrischen Kristall (wie  $\text{LiNbO}_3$ , Quarz und Langasit) aufgebracht wird. Die Piezoelektrizität setzt besondere Symmetrieeigenschaften, sowie Orientierung des Kristalls relativ zum angelegten elektrischen Feld voraus. Bei der Anregung des Wandler mit einem RF-elektromagnetischen Signal wird durch den umgekehrten piezoelektrischen Effekt eine dynamische Verzerrung und damit eine akustische Oberflächenwelle erzeugt. **[Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]**

SAW-Bauelemente finden Anwendung in der elektronischen und elektro-optischen Signalverarbeitung (Filter, Korrelatoren, optische Modulatoren, Sensoren, usw.). Die Integration von kristallinen SAW-Bauelementen mit Silizium-Chips kann mittels eines Hybridprozesses realisiert werden, bei dem fertige Elementen miteinander verbunden werden. Da Silizium nicht piezoelektrisch ist, setzt die monolithische Fabrikation von SAW-Bauelementen auf einem Si-Chip die Verfügbarkeit von piezoelektrischen Zwischenschichten voraus, die auf Si abgeschieden werden können. Das Abscheiden von epitaktisch gewachsenen Schichten auf Si (z.B. GaN und AlN) ist aufgrund der Gitterfehlpassung, sowie der Inkompatibilität der Wachstumsbedingungen (z.B. Temperatur, Präparation der Oberfläche, usw.) schwierig. Alternativ können texturierte Schichten aus piezoelektrischen

Materialien, d.h. polykristalline Schichten mit einer Vorzugsorientierung verwendet werden. Hierfür werden polykristalline Schichten aus Materialien mit Wurtzit-Struktur verwendet, die mit einer Vorzugsorientierung abgeschieden werden können. Beispiele sind CdS, ZnO-, AlN-Schichten, bei denen die bevorzugte Orientierung der c-Achse senkrecht zur Oberfläche zur Piezoelektrizität führt.

Verschiedene Verfahren für die monolithische Herstellung von SAW-Bauelementen wurden untersucht. Die monolithische Integration von AlN-basierenden Bulk-Acoustic-Wave (akustische Volumenwellen) (BAW)-Filtern für Frequenzen bis 8.5 GHz wurde demonstriert. Für diese Technologie benötigt man einen piezoelektrischen Film, der zwischen zwei Elektroden abgeschieden wird. Zudem ist eine Schwingungsisolation zum Siliziumsubstrat nötig.

Die monolithische Integration von Oberflächenwellen- (SAW-) Filtern ist daher vom technologischen Standpunkt aus betrachtet vorteilhaft, da die Lokalisierung der Oberflächenwelle in einer dünnen Oberflächenschicht, eine Schwingungsisolation zum Siliziumsubstrat überflüssig macht, und dadurch die Herstellungskosten aufgrund der geringeren Anzahl an Prozessschritten deutlich niedriger sind. So berichteten zum Beispiel Motamedi *et al.* über monolithische SAW-Convolver für den Frequenzbereich um 350 MHz. Die Technische Universität Delft (Holland) hat die monolithische Integration von ZnO-basierten SAW-Filtern auf Silizium realisiert, in denen die piezoelektrische Schicht (ZnO) auf die Fingerelektroden abgeschieden wurde. Mittels dieses Prozessablaufes wurden SAW-Bauelemente mit Frequenz bis 80 MHz realisiert. Eine Erweiterung dieser Technologie auf technologisch interessante höhere Frequenzen im GHz-Bereich ist allerdings nicht möglich, da die mit Hochfrequenzputtern abgeschiedene piezoelektrische Schicht nicht glatt auf der schmalen Elektrodenstrukturen wächst.

Der neue Lösungsansatz dieses Verbundprojektes bietet die Möglichkeit der hybrid- sowie monolithischen (Bi)CMOS-kompatiblen Integration von SAW-Bauelementen im Frequenzbereich um 2.4 GHz. Mit dieser neuen Technologie wird zunächst die Fingerstruktur in das SiO<sub>2</sub> eingebettet und anschließend die piezoelektrische Schicht mittels Hochfrequenzputtern auf eine glatte Oberfläche abgeschieden. Die Lithographie des IHP lässt Strukturbreiten bis minimal 0,13 µm zu. Dies entspricht theoretischen SAW-Frequenzen von bis zu 7.5 GHz und liegt somit weit über dem in der Literatur berichteten Wert.

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Partner des Verbundprojekts „SAW Funkmodule“ waren:

- Paul-Drude-Institut in Berlin
- TeleBITcom gmbh in Teltow

## II. Eingehende Darstellung

### 1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Projekt startete am 01.10.2008. Das zugehörige Kick-off Meeting fand am 24.11.2008 beim Projektkoordinator TeleBITcom in Teltow statt. Das Konsortium traf sich während der Projektlaufzeit zweimal pro Jahr.

Die Arbeitspakete und deren Teilaufgaben sind in dem folgenden Balkenplan zeitlich aufgelöst dargestellt:

Arbeitspakete mit IHP Beteiligung	Partner	Projektjahr 1				Projektjahr 2				Projektjahr 3			
		Q 1	Q 2	Q 3	Q 4	Q 5	Q 6	Q 7	Q 8	Q 9	Q 10	Q 11	Q1 2
AP 02 Evaluierung und Schnittstellen-Definition für hybride Lösung	BIT, IHP												
AP 03 Integration der IDT-Strukturen in den Prozessablauf	IHP												
AP 05 Schaltungsentwurf und Herstellungsprozess für hybride Module	BIT, IHP												
AP 07 Inbetriebnahme und Test der Si-HW und SAW-Funktionen	BIT, IHP												
AP 09 Evaluierung der AlN-Parameter für SAW-Anregung	PDI, IHP												
AP 10 Kontaminationsstudien zur ZnO- und AlN-Integration	PDI, IHP												
AP 11 Entwurf des Systemkonzepts eines integrierten Multi-Band-Moduls	BIT, IHP												
AP 12 Prototyp eines integrierten SAW-Filters mit HF-Elektronik	BIT, PDI, IHP												

Die Integration von wolframbasierten Interdigitaltransducern (IDT) mittels des Abscheideverfahrens Chemical Vapour Deposition (CVD) und anschließendem Chemisch-Mechanischem Polieren (CMP) wurde Ende 2008 bearbeitet.

Durch die Optimierung der Prozessparameter Druck und Gasfluss gelang es, integrierte hohlraumfreie W-IDT mit einer Breite von 250 nm und einer Stegtiefe von 100 nm

herzustellen. Die prozessierten Metallstrukturen wurden dem PDI zur ZnO Abscheidung zur Verfügung gestellt.

Des Weiteren wurde eine geeignete Rezeptur für die Trockenätzmethode Reactive Ion Etching (RIE) entwickelt. Die größte Ätzrate von 10 nm / min wurde mittels SF<sub>6</sub> erreicht.

Für eine mögliche integrierte Version des Empfängerchips wurde ein Konzept erarbeitet. Anschließende Systemsimulationen lieferten die für die einzelnen Schaltungsblöcke entscheidenden Parameter und den Pegel-plan. Eine gegenüber dem Vorschlag von TeleBITcom vereinfachte Struktur wurde zur Diskussion gestellt. Aufbauend darauf wurden für die folgenden Arbeiten im AP05 Schaltungsblöcke ausgewählt. Ziel ist hier den Nachweis der Funktionalität des integrierten Schaltungsteils mit externen SAW-Filtern zu erbringen. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Anpassung der Filter an die Mehrfachmischereinheit. Diese Realisierung wurde daher Bestandteil des ersten Durchlaufs in der IHP-eigenen Value-Technologie.

Die Integration von wolframbasierten Interdigitaltransducern (IDT) mittels des Abscheideverfahrens Chemical Vapour Deposition (CVD) und anschließendem Chemisch-Mechanischem Polieren (CMP) wurde optimiert.

Durch die Optimierung der Prozessparameter Druck und Gasfluss gelang es, integrierte hohlraumfreie W-IDT mit einer Breite von 250 - 500 nm und einer Stegtiefe von 100 nm – 200 nm herzustellen (siehe Abb. 1). Der Nachweis der Integrationsmöglichkeit von IDT-Strukturen im IHP (Meilenstein 2) wurde somit erbracht.

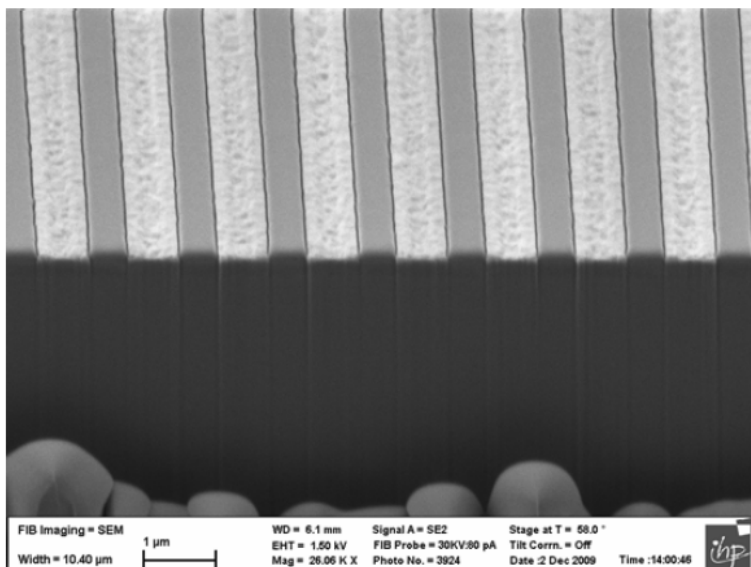


Abb. 1: Schnitt durch die integrierten Wolfram IDTs.

Die im vorhergehenden Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten zu Parametern des Systems und der einzelnen Schaltungsblöcke wurden im 2. Halbjahr 2009 in konkrete Schaltungen umgesetzt. Schwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung integrierter Schaltungen für den dem SAW-Filter folgenden Pulsdemodulator. In Absprache mit TeleBITcom und zur Reduzierung des Risikos wurden jeweils beide Konzepte des Demodulators umgesetzt (Abb. 2).

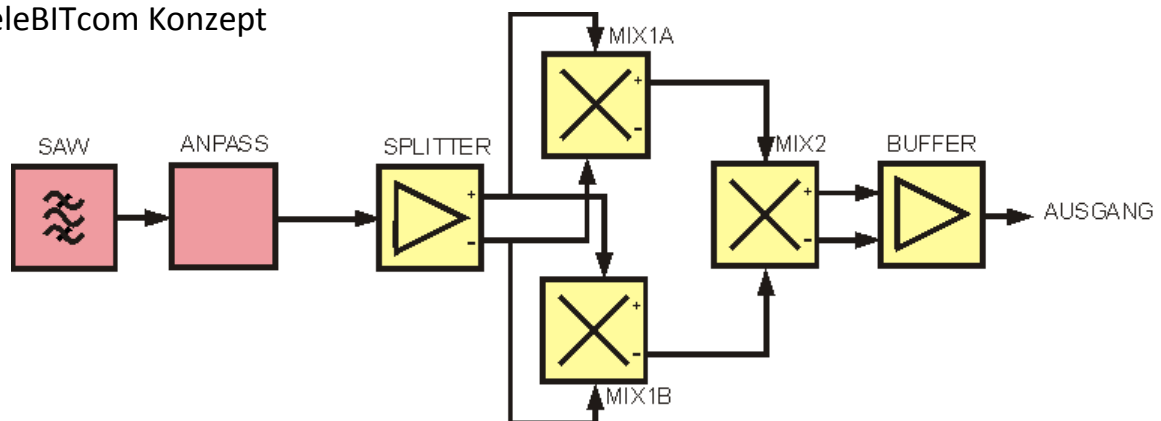


Um erste Aussagen zur Quadriereinheit zu erlangen wurde im September 2009 ein Testchip mit diesem Schaltungsdetail in die Pilotlinie des IHP eingesteuert. Die Muster wurden im März 2010 prozessiert.

Im Anschluss daran wurde die Umsetzung der beiden Varianten des Pulsdemodulators bis hin zum Digitalausgang vorangetrieben. Eine umfangreiche Simulation der sich im Schaltungsaufwand unterscheidenden Varianten brachte kein wesentlich voneinander abweichendes Verhalten gegenüber den mathematisch grob angenäherten Eingangssignalen. Insbesondere wurde der Einfluss der Variationen der Betriebsspannungen untersucht. Tabelle 1 gibt eine Zusammenfassung dieser Untersuchungen. Abb. 3 zeigt das simulierte Verhalten des Pulsdemodulators.

Beide Schaltungsblöcke wurden auf einem Chip integriert, um so die Möglichkeit des direkten Vergleiches zu gewährleisten (Abb. 4). Die aktive Fläche jedes Blockes beträgt  $410 \times 125 \mu\text{m}^2$ . Die Muster wurden für den Mai 2010 realisiert.

TeleBITcom Konzept



IHP Konzept

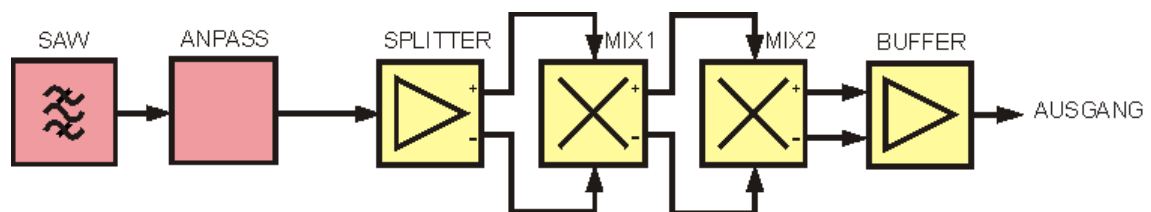


Abb. 2: Blockschaubilder der beiden Varianten des Pulsdemodulators

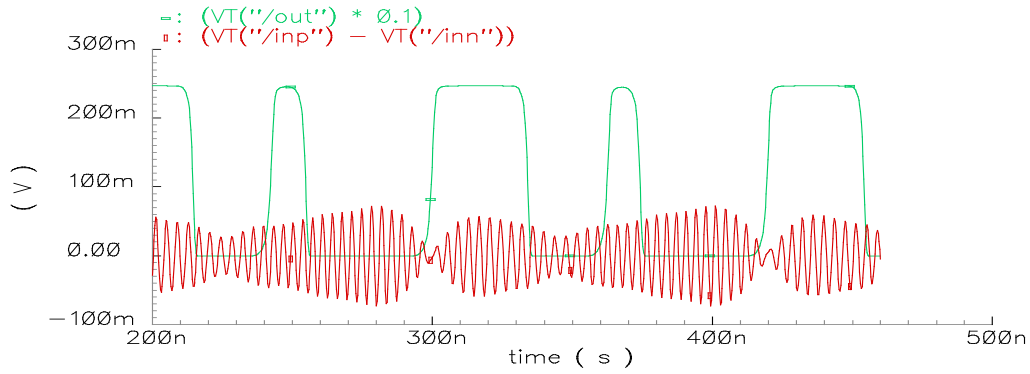


Abb. 3: Simulierte Signale am Ein- und Ausgang

Parameter	TeleBITcom	IHP
<b>Stromaufnahme</b>		
<b>I<sub>cc</sub> @ 3.0 V</b>	15 mA	11 mA
<b>I<sub>dd</sub> @ 2.5 V</b>	3.5 mA	3 mA
<b>Funktionalität @ 85 °C</b>		
<b>V<sub>cc</sub></b>	2.7 ... 3.6 V	2.4 ... 3.6 V
<b>Eckwerte der Versorgungsspannungen</b>	ja	ja

Tabelle 1 Leistungsaufnahme und Funktionalität

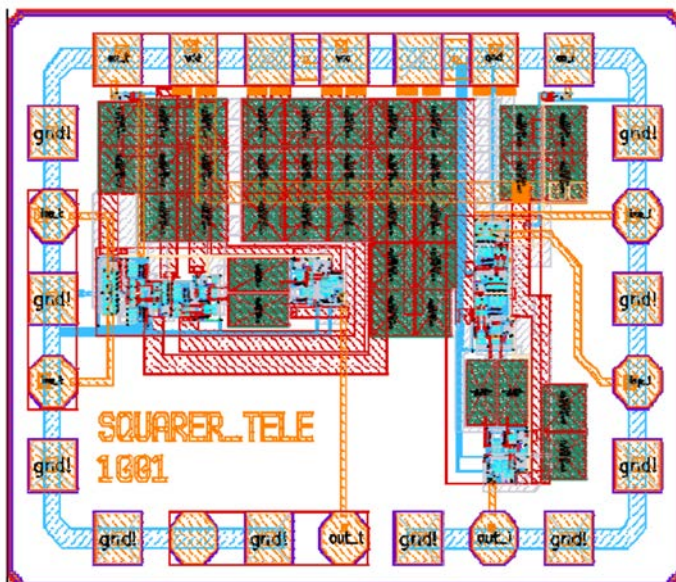


Abb. 4: Layout des kombinierten Chips

Die durchgeführten Entwurfsarbeiten zum Pulsdemodulator wurde im Reinraum des IHP mit der 0,25µm SiGe-HBT-Technologie SGB25V prozessiert und lagen im 1. Halbjahr 2010 als Si-Chips zur Evaluierung vor. Wie schon früher erwähnt, wurden 2 Varianten der Schaltung auf einem Chip integriert. Somit ist ein direkter Vergleich möglich.

Insgesamt wurden 4 Chips für die Messungen auf Leiterplatten geklebt und gebondet. Tabelle 2 listet wesentliche Parameter auf, die für beide Varianten gemessenen wurden.

Tabelle 2 Messwerte:

Parameter	TeleBITcom	IHP
<b>Stromaufnahme</b> I <sub>cc</sub> @ 3.0 V I <sub>dd</sub> @ 2.5 V	14,5 mA 4 ... 7 mA	11,5 mA 3 ... 6 mA
<b>Eingangsspegel, symmetrisch,</b> f = 268 MHz, AM = 100 kHz	- 33 ... - 21 dBm	- 33 ... - 21 dBm
<b>Fläche</b>	410 x 125 µm <sup>2</sup>	410 x 125 µm <sup>2</sup>

Für die Messung des Eingangsbereiches wurde ein mit 100 kHz AM-moduliertes 268 MHz-Sinussignal verwendet. Eine bessere Nachbildung des typischen Signals verlangt eine 8,33 MHz-AM-Modulation, die der zur Verfügung stehende Signalgenerator nicht bereitstellen kann. Bei Funktionsfähigkeit der Schaltungen ergibt sich das in Abbildung 5 dargestellte Oszillogramm.

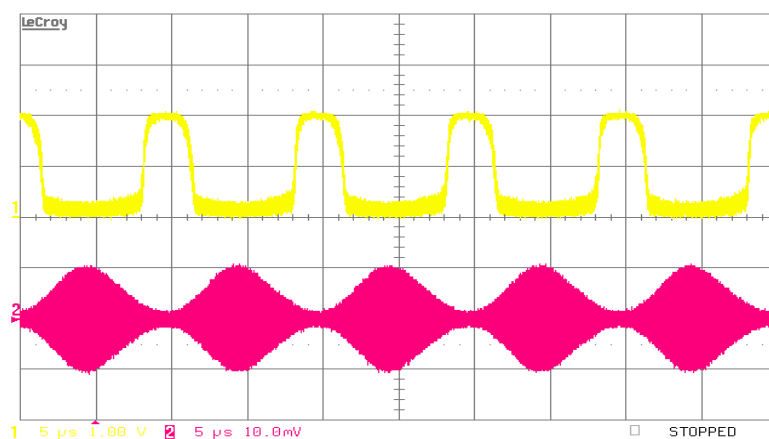


Abb. 5: Ein- und Ausgangssignale des Pulsdemodulators bei synthetischer Ansteuerung

Dieses Verhalten zeigen nicht alle gemessenen Schaltungen. Bei den meisten Schaltungen, insbesondere bei der TeleBITcom-Variante sind die Schwingungen während der Low- und High-Phasen deutlich stärker ausgeprägt (s. Abb. 6). Simulationen, bei denen eine bewußte Störung der Symmetrie der Schaltungen provoziert wurde, konnten dieses Verhalten noch nicht abbilden.

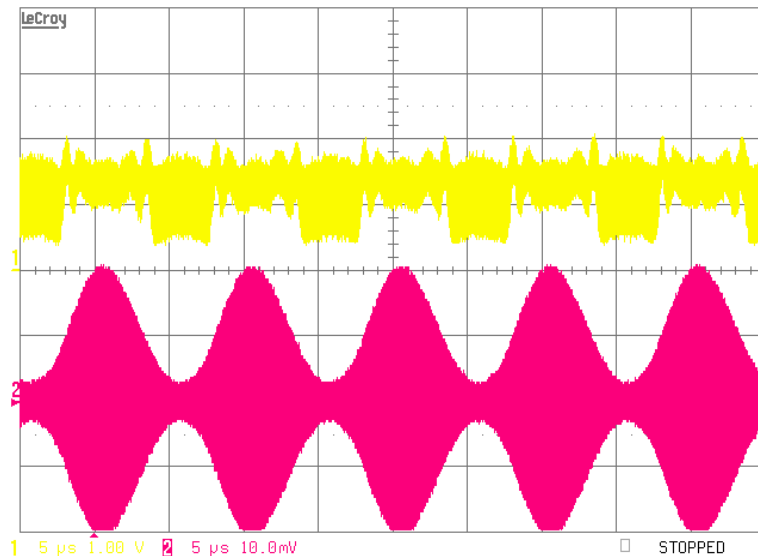


Abb. 6: Ausgangssignale des Pulsdemodulators mit Schwingungen während der Low- und High-Phase

Ebenso zeigen die meisten Schaltungen ein besseres dynamisches Verhalten, wenn VDD bis auf 2 V gesenkt wurde. Das stimmte mit der gegenüber der Simulation etwas erhöhten Stromaufnahme  $I_{dd}$  überein, die bei der abgesenkten Spannung die berechneten Werte annahm. Insbesondere mit verringerter Vdd-Spannung verhielten sich die Schaltungen bei Ansteuerung mit dem von TeleBITcom bereit gestellten SAW-Filtergenerator vorteilhafter (s. Abb. 6). Da der Ausgangspegel dieses Generators mit -35 dBm fest eingestellt war, für eine Aussage zum dynamischen Verhalten jedoch auch höhere Pegel notwendig waren, mussten diese Messungen mit Hilfe eines Verstärkers noch durchgeführt werden. Das grundsätzliche Verhalten der Schaltungen zeigt die Abb. 7 anschaulich.

Zur Optimierung der Schaltung sind weitere Untersuchungen notwendig. Für den Herbst 2010 war die Einsteuerung des Redesigns geplant. Der Vergleich der Varianten zeigte geringe Vorteile, wie geringere Stromaufnahme und bessere Empfindlichkeit, für die integrierte IHP-Version des Pulsdemodulators. Nach erfolgreichem Redesign war eine Entscheidung für eine der Varianten bei der beabsichtigten Integration mit dem SAW-Filter zu treffen.

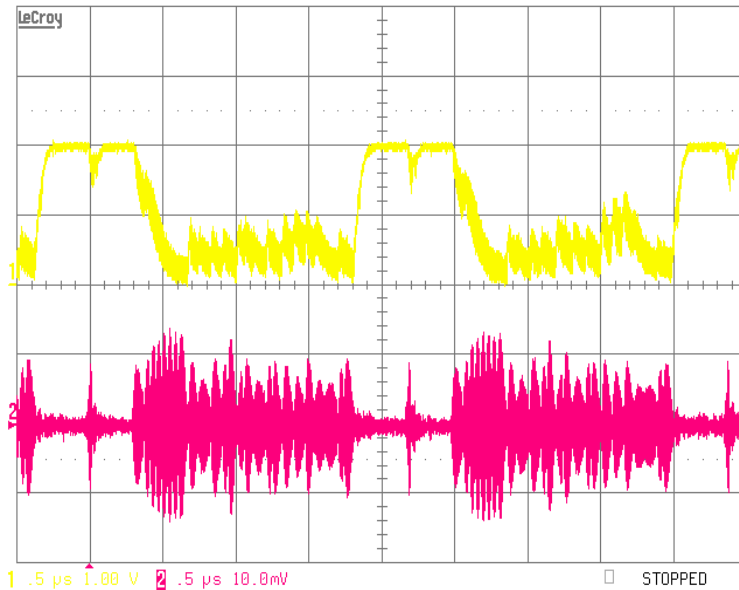


Abb. 7: Ausgangssignal bei Ansteuerung mit dem SAW-Filtergenerator (IHP-Version)

Die ersten Abscheidungen mittels gepulsten DC-Sputterns von AlN Schichten wurden durchgeführt. Hierzu wurden ca. 700 nm dicke AlN Schichten auf den folgenden Substraten abgeschieden: Si, SiO<sub>2</sub> und W(mit CMP behandelte Oberfläche). Wie in Abb. 8 repräsentativ dargestellt, wachsen die AlN Schichten in der gewünschten Säulenstruktur.

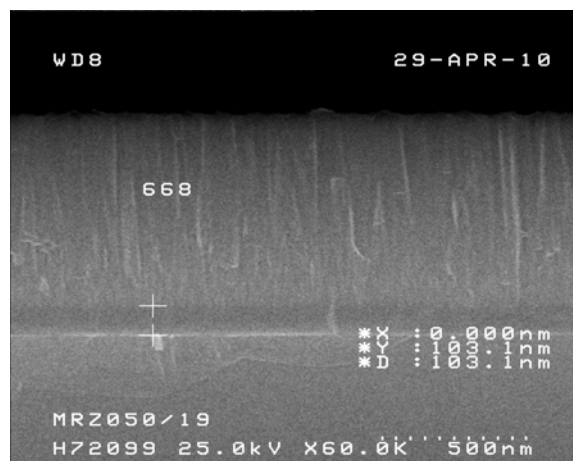


Abb. 8: SEM Aufnahme einer 700 nm dicken AlN Schicht auf SiO<sub>2</sub>.

Die AlN Schichten wurden zudem mittels XRD auf deren Struktur untersucht. Wie in Abb. 9 zusammengefasst, wiesen die AlN auf allen Substraten eine deutliche Wachstumsorientierung in Richtung der gewünschten 002-Ebene.

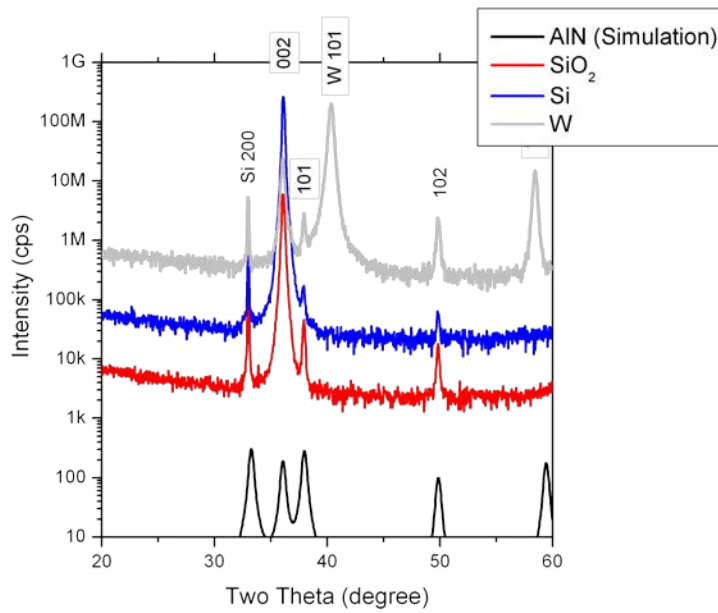


Abb. 9: XRD Aufnahmen der AlN auf unterschiedlichen Substraten.

Zur Kontaminationproblematik von ZnO und AlN wurden thermische Belastungen der piezoelektrischen Schichten auf Si und SiO<sub>2</sub> durchgeführt. Zunächst wurden AlN Schichten auf Wolfram, bzw. SiO<sub>2</sub> untersucht. Die thermische Belastbarkeit der AlN Schichten wurden in einem CMOS typischen Temperaturfenster von 400 – 600 °C untersucht. Das Schichtsystem AlN/SiO<sub>2</sub> erweist sich hierbei als temperaturstabil (s. Abb. 10).

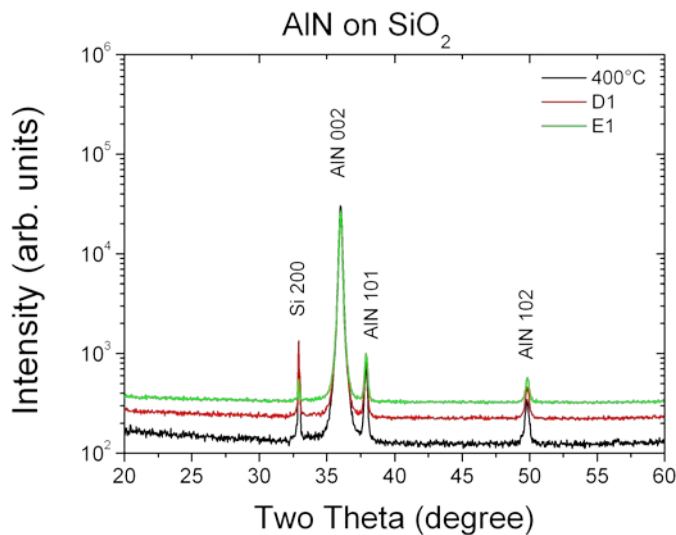


Abb. 10: Röntgendiffraktometrie-Aufnahmen des Schichtstapels AlN/SiO<sub>2</sub>. Im Temperaturbereich 400 °C (schwarze Linie), 500 °C (rote Linie) und 600 °C (grüne Linie) zeigt sich keine Veränderung der Kristallstruktur.

Den gleichen Untersuchungen wurde das Schichtsystem AlN/W unterworfen. Hierbei zeigt sich, dass auch dieser Stapel thermisch stabil ist.

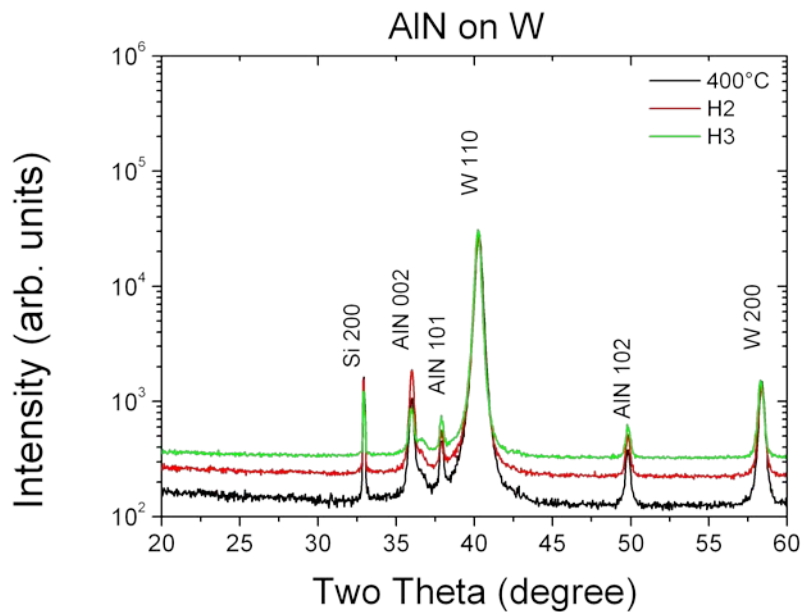


Abb. 11: Röntgendiffraktometrie-Aufnahmen des Schichtstapels AlN/W. Im Temperaturbereich 400 °C (schwarze Linie), 500 °C (rote Linie) und 600 °C (grüne Linie) zeigt sich keine Veränderung der Kristallstruktur.

Mittels der 0.25  $\mu\text{m}$ - BiCMOS Technologie des IHPs wurden diskrete SAW Bauelemente mit einer Schaltfrequenz von 2.44 GHz entworfen und realisiert. SAW Filter bei 2.44 GHz wurden präpariert und sind zum Projektpartner PDI zur Charakterisierung übergeben worden.

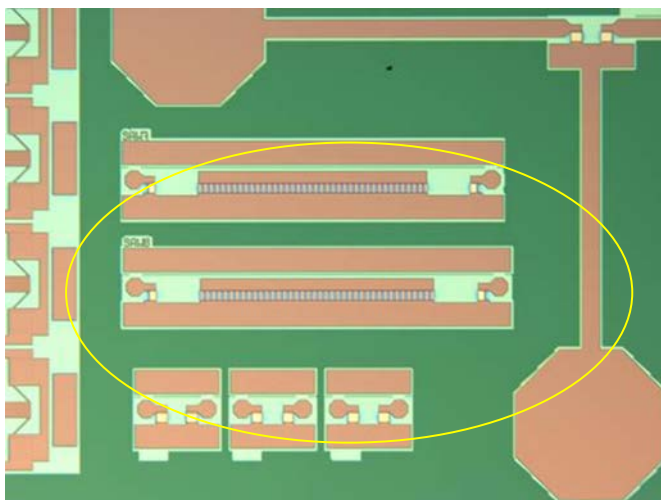


Abb. 12: Diskrete SAW Bauelemente mit einer Schaltfrequenz von 2.44 GHz (innerhalb der gelben Markierung)

Es wurde die Evaluierung der beiden integrierten Pulsdemodulator-schaltungen fortgesetzt. Dazu wurde die Prüfliterplatte mit dem Chip, das beide Varianten der Schaltung beinhaltet, in die typische Applikationsumgebung bei der Firma TeleBITcom eingefügt und verschiedenen Messungen unterzogen. Wie auch schon im IHP-Labor festgestellt wurde, ist für den einwandfreien Betrieb der Schaltungen eine optimale Anpassung der Arbeitspunkte notwendig. Nachdem dies erfolgte, wurden überzeugende Ergebnisse erreicht. Beide Schaltungsvarianten weisen gegenüber der Originalschaltung von TeleBITcom eine bessere Empfindlichkeit auf. Damit lassen sich im praktischen Einsatz größere Reichweiten und/oder geringere Signalfeldstärken realisieren. Abb. 13 zeigt die Korrelation von gesendetem und im Empfänger demoduliertem Signal bei noch nicht optimal eingestelltem Arbeitspunkt.

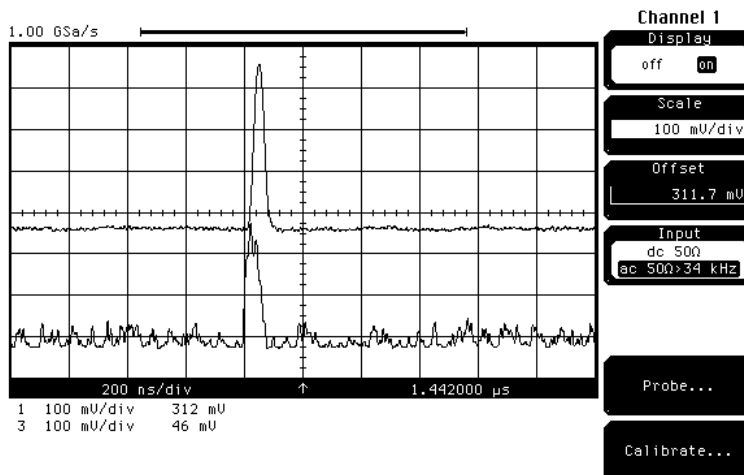


Abb. 13: Gesendeter und demodulierter Impuls

Bei der Anwendung von Doppelpulsen zeigte die von TeleBITcom favorisierte Schaltungsvariante ein eindeutig besseres dynamisches Verhalten. Trotz mathematisch identisch realisierter Umsetzungen konnte die Ursache für die Unterschiede im Verhalten beider Schaltungsvarianten (noch) nicht schlüssig erklärt werden.

Den zweiten Schwerpunkt im Zeitraum 2011 bildete der Entwurf und die Umsetzung eines programmierbaren Pulsgenerators für die 2,44-GHz-Sendestufe. Mittels einer 2-bit-Adresse konnte die Anzahl der zu sendenden Pulse auf den Wert 1, 2, 4 oder 8 gesetzt werden. Die Ansteuerung des SAW-Filters erfolgte symmetrisch. Abb. 14 zeigt das Taktsignal, den Triggerimpuls und das hier gewählte Ausgangssignal mit 8 Pulsen.

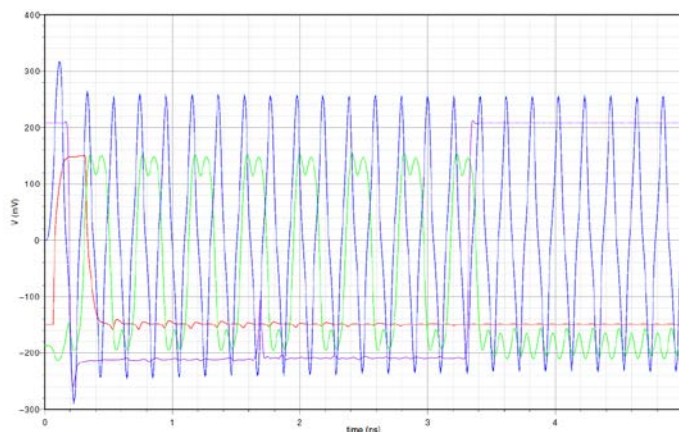


Abb. 14: Simulierte Pulsgeneratorsignale mit  $n=8$



Die im Silizium realisierte Fläche bemisst sich auf  $2,03 \times 0,9 \text{ mm}^2$  (s. Abb. 15). Erste Muster dieser Schaltung wurden im März 2011 erwartet.

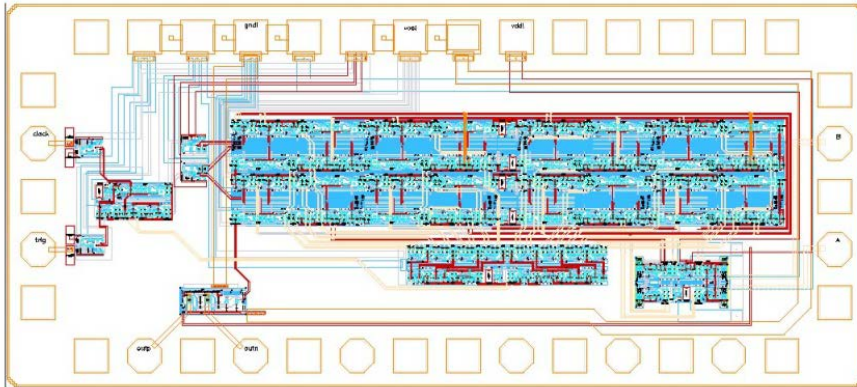


Abb. 15: Layout des programmierbaren Pulsgenerators

Die Funktionalität des Pulsgenerators wurde beim Abschlußtreffen im IHP Frankfurt / Oder am 08.02.2012 erfolgreich demonstriert.

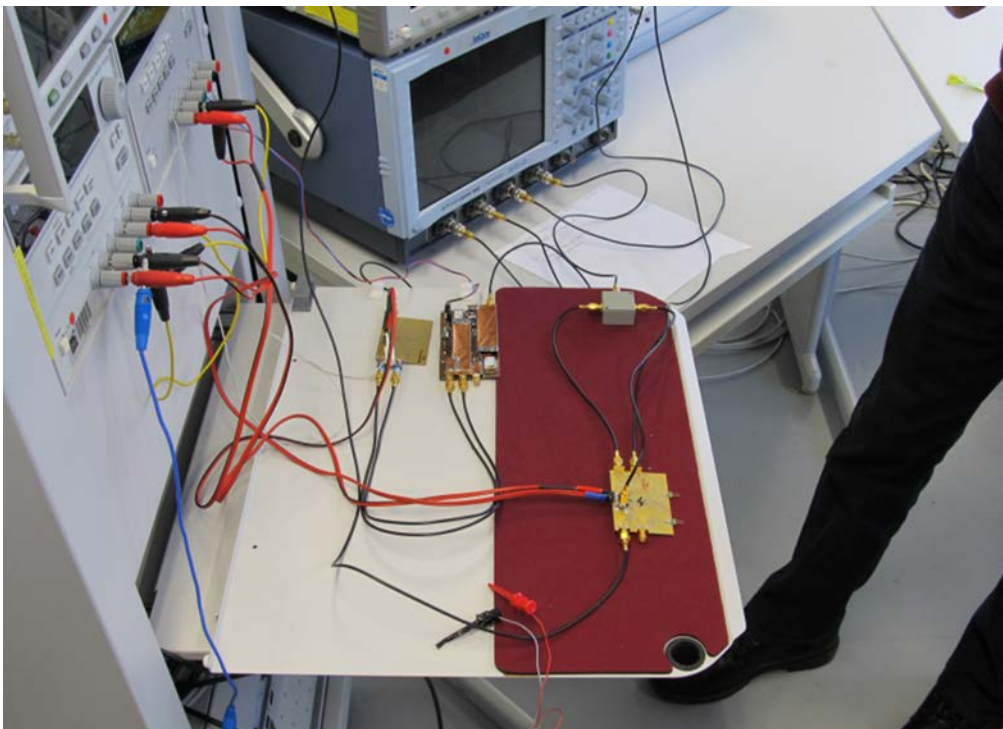


Abb. 16: Funktionalitätstest des gebondeten Pulsgenerator beim Abschlußtreffen des Verbundprojektes.

## **2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Pos. 0812 beinhaltet die Personalausgaben für 1.5 Mitarbeiter für 3 Jahre

Pos. 0843 beinhaltet einen Zuschlag von 10 % auf die gesamten für das Vorhaben angesetzten Personalausgaben zur Deckung der mit dem Verwendungszweck zusammenhängenden Ausgaben für Infrastrukturleistungen. Des Weiteren wurden in drei Jahren der Projektlaufzeit Verbrauchsmaterial für die Realisierung der Schaltkreise und SAW Filter benötigt.

Pos. 0846 beinhaltet Dienstreisen zu Projekttreffen und nationalen und internationalen Konferenzen.

## **3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Das IHP besitzt auch eine hauseigene vertikale Verwertungsstrategie. Die Ergebnisse werden in die 0,13  $\mu\text{m}$ -BiCMOS-Technologie einfließen und zu System-On-Chip (SOC) – Lösungen für innovative drahtlose Systeme führen (z. B. Radiofrequenz (RF) – Komponenten, Sender und Empfänger für drahtlose lokale Netzwerke, Schaltkreise für automobiles Radar).

Mit der angestrebten monolithischen Integration von SAW-Filtern wurde im IHP eine Einzelchiptechnologie für die drahtlose Breitbandkommunikation etabliert, die zu einer deutlichen Kompetenzerweiterung führte, denn in der Systementwicklung des IHP sind SAW-Filter wichtige passive Bauelemente für Radiofrequenz- und integrierte Schaltungen.

Das IHP wird mit der geplanten Technologie durch die Vereinfachung der Bauteilfertigung eine Ausnahmestellung im wirtschaftlichen Wettbewerb für System-on-Chip-Lösungen zukünftiger Funkssysteme sowohl in Kraftfahrzeugen als auch in der Industrie erhalten.

Für die Entwicklung neuer Technologien ist es bei zunehmender Funktionalität der Chips von entscheidender Bedeutung, SAW Filter monolithisch zu integrieren. Dieser Herausforderung stellte sich das IHP in diesem Projekt, in dem es neue Materialien und Architekturen in die bestehende Technologie integriert. Die Lösung dieser Aufgabe und die Verwertung der Forschungsergebnisse durch TeleBITcom gmbh für drahtlose Anwendungen werden über weitere wirtschaftliche Erfolge entscheiden.

## **4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Das IHP erhielt durch die gewonnenen Ergebnisse dieses Projektes eine deutliche Kompetenzerweiterung. Insbesondere werden die Erkenntnisse in die Charakterisierung der funktionalen Bauelemente in der 0.13  $\mu\text{m}$ -BiCMOS-Pilotlinie des IHP einfließen. SAW-Filter sind in der Systementwicklung des IHP wichtige passive Bauelemente für Radiofrequenz (RF)- und integrierten Schaltungen (IC) in der Systementwicklung des IHP. Die

Innovationspalette des IHP von der Materialforschung bis zur Systementwicklung wird durch die Erkenntnisse ergänzt.

Darüber hinaus wird das IHP im Rahmen dieses Projektes sehr eng mit dem Paul-Drude-Institut Berlin mit dem Ziel zusammenarbeiten, bei der Suche nach alternativen neuartigen Materialien und deren Schichtoptimierung auch Beiträge zur Weiterentwicklung moderner Bauelemente wie Modulatoren für die Datenübertragung per Licht zu leisten.

Ausgewählte Ergebnisse des Projekts werden sukzessive in Lehrveranstaltungen des Fachgebiets Materialforschung in der jährlichen Sommerschule „Mikroelektronik“ in Frankfurt (Oder) einbezogen und verbessern somit die Qualität der studentischen Ausbildung.

#### **5. des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Dem Zuwendungsempfänger sind im Verlauf des Vorhabens keine Ergebnisse bekannt geworden, die das Ergebnis der Arbeit beeinflusst haben.

#### **6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse**

##### **(1) Functionalized Back-End Devices for (Bi)CMOS Circuits**

Ch. Wenger, Ch. Walczyk, M. Lukosius, D. Wolansky, P.V. Santos  
ECS Transactions **33**(6), 823 (2010)

##### **(2) Monolithic Integrated SAW-Filter based on AlN for High-Frequency Applications**

U. Kaletta, P.V. Santos, D. Wolansky, A. Scheit, M. Fraschke, Ch. Wipf, P. Zaumseil, Ch. Wenger  
eingereicht bei IEEE Transactions on Electron Devices