

Entwurf von Transceiver MMICs für breitbandige FMCW-Radarsysteme über 100 GHz in modernen SiGe-Bipolartechnologien

Christian Bredendiek

Seit einigen Jahren wird in der Forschung versucht die sogenannte Terahertz-Lücke („terahertz gap“) sowohl von der optischen als auch von der elektronischen Seite aus zu erschließen. Die Terahertz-Lücke wird dabei traditionellerweise als der Frequenzbereich zwischen 0,1 THz und 10 THz bezeichnet. Die Elektronik versucht mit Hilfe moderner Halbleiter-Technologien und höheren Grenzfrequenzen diesen Frequenzbereich aus dem Millimeterwellen-Bereich (30 GHz - 300 GHz, 1 mm - 10 mm) nach oben zu erobern.

Das Hauptproblem der Terahertz-Lücke bzw. der Grund für ihre Existenz liegt in der Herstellung von hinreichend guten Sendern und Empfängern. Die Signalerzeugung mit einer ausreichenden Ausgangsleistung ist dabei das Problem bei der Herstellung von kompakten Sendern. Die Empfänger sind dagegen in ihrer Empfindlichkeit bei der Detektion von schwachen Signalen stark beschränkt, da die verfügbaren Empfänger auf Grund ihres vorwiegend subharmonischen Betriebes ein hohes Rauschen aufweisen.

Das Ziel in dieser Arbeit ist dagegen genau diese Entwicklung und dieser Entwurf von vollständig integrierten Transceiver MMICs mit fundamental betriebenen Empfängern bei Betriebsfrequenzen von über 100 GHz. Zur Demonstration dieser Realisierbarkeit solcher Transceiver für FMCW-Radarsysteme mit hohen Bandbreiten werden in dieser Arbeit moderne SiGe-Bipolar-Halbleitertechnologien eingesetzt. Dabei sollen möglichst viele der hochfrequenten Schaltungsteile auf einem Chip integriert werden (System on Chip, SoC), um eine möglichst stromsparende Realisierung mit wenigen kritischen Schnittstellen zu erreichen.

Der Kern der Arbeit wird durch die Betrachtungen von verschiedenen Konzepten zur Signalerzeugung nahe der Grenzfrequenz f_T gebildet, da dies die größte Herausforderung bei der Realisierung eines Transceivers darstellt. Dabei wird die These aufgestellt, dass die Kombination aus Frequenzverdopplern und fundamentalen Oszillatoren zu den ausgewogensten Ergebnissen einer Signalquelle führt. Im Weiteren Verlauf werden drei verschiedene Signalquellen um 150 GHz aus einem fundamentalen Oszillator bei 75 GHz in Kombination mit einem Verdoppler sowohl theoretisch als auch praktisch anhand von Messergebnissen ausführlich untersucht. Die erste dieser drei Signalquellen beruht auf der Frequenzumsetzung mit Hilfe eines Mischers der direkt an beiden Eingängen vom Oszillator angesteuert wird. Die zweite vorgestellte Variante setzt auf einen aktiven Dioden-Verdoppler, bei dem die Dioden durch eine Basisemitterstrecke eines SiGe-HBTs ersetzt werden und die verbleibende Stromverstärkung der Transistoren am gemeinsamen Kollektor ausgenutzt wird. Die letzte behandelte Variante ist die einzige passive und setzt dabei auf die nichtlineare Kennlinie eines pn-Varaktors als Bauelement in Kombination mit einer HF-Ringstruktur zur Vervielfachung. Die aktiven Varianten können dabei die vierfache Ausgangsleistung (6 dB mehr) als die passive Variante bei wesentlich weniger als die doppelte Verlustleistung liefern.

Nach dieser ausführlichen Behandlung der einzelnen drei Konzepte werden diese in einer ausführlichen Diskussion dem aktuellen Stand der Technik gegenübergestellt und mittels einer eingeführten Maßzahl $FoM_{VCO-PAT}$ bewertet. Bei dieser Bewertung stellen sich die beiden aktiven Varianten (Gilbertzelle und aktiver Dioden-Verdoppler) im Vergleich mit allen Signalquellen um 150 GHz, sowohl den eigenen Signalquellen (ca. 4 dB besser) als auch denen der Literatur (ca. 10 dB besser), deutlich als Optimum dar. Der Vorteil dieser Konzepte wird umso deutlicher, wenn die Technologien aus der Literatur ($f_{T,Lit} > 225$ GHz) mit der verwendeten B7HF200-Technologie ($f_{T,B7HF200} = 170$ GHz) verglichen wird. Unter der Hinzunahme weiterer Kriterien, wie der Unterdrückung der Grundwelle und der 3 dB-Bandbreite ist die zweite Variante (aktiver Dioden-Verdoppler) dagegen das optimale Schaltungskonzept für eine Signalquelle nahe der Grenzfrequenz f_T .

Nach den Betrachtungen der Signalquelle als Schlüsselkomponente eines jeden Transceivers werden weitere Schaltungsblöcke vorgestellt, die zur Umsetzung des ausgewählten FMCW-Radarkonzeptes mit einer Offset-PLL nötig sind. Dabei werden Abwärtsmischer, Koppler, hochfrequente Frequenzteiler und PLL-Offset-Mischer behandelt. Mit Hilfe der vorgestellten Signalquellen wurde ein vollständiger Transceiver MMICs bei 146 GHz realisiert. Mit Hilfe des Transceiver-MMICs bei 146 GHz wurde ein FMCW-Radardemonstrator entwickelt und anhand dessen erste Messergebnisse in verschiedenen Szenarien evaluiert.

Der so erzeugte Radardemonstrator zeigt dabei eine Modulationsbandbreite von 48 GHz, die den aktuellen Stand der Technik bei 147,5 GHz mit 9 GHz Bandbreite, bei 143 GHz mit 2 GHz und bei 120 GHz mit 8,7 GHz Bandbreite im Frequenzbereich von 110-170 GHz (D-Band) deutlich übersteigt. Mit diesen Transceivern mit fundamental betriebenen Empfängern und den Radardemonstratoren lassen sich somit Radarsysteme mit bisher unerreichten Auflösungsvermögen verwirklichen. Die Erschließung neuer Märkte, neuer Anwendungen und somit den Vorstoß in die Terahertz-Lücke mit Hilfe der modernen und kostengünstigen SiGe-Technologien kann.