

Kapitel 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die eingereichte Doktorarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer optischen Meßtechnik, die zur Untersuchung und Charakterisierung von koplanaren Hochfrequenz-Bauelementen und -Schaltungen eingesetzt werden soll. Eine solche Meßtechnik wird notwendig, um mit möglichst geringer Beeinflussung des Meßobjekts dessen Hochfrequenzverhalten auch schaltungsintern ermitteln zu können. Herkömmliche Netzwerkanalysatoren scheiden dazu in zweifacher Hinsicht aus. Ihre Meßbandbreite endet bei etwa 120 GHz, einem Wert, der z.B. von Oszillatoren oder resonanten Tunneldioden (RTD) längst überschritten wird, und mit ihnen lassen sich zwar on-wafer, nicht aber schaltungsinterne Messungen durchführen.

Neben einigen anderen Meßmethoden konnte sich zur Umgehung dieser Problematik die elektrooptische Meßtechnik etablieren. Sie nutzt den linearen elektrooptischen oder Pockels-Effekt, d.h. die feldinduzierte Polarisationsänderung eines Laserstrahls bei dessen Durchgang durch ein elektrooptisches Medium. Durchgesetzt hat sich diese Meßtechnik vor allem in Verbindung mit Kurzpulslasern, d.h. die Sampling-Technik wird hier zur Transformation des hochfrequenten Mikrowellensignals hin zu Meßfrequenzen im Bereich weniger kHz angewendet.

In dem vorhandenen Meßsystem erzeugt ein aktiv modengekoppelter Nd:YAG-Laser in Verbindung mit einem Glasfaser-Gitter-Pulskompressor optische Pulse mit 5 ps Pulsbreiten, und die Meßfrequenz, auf die das Mikrowellensignal transformiert wird, beträgt 18 MHz. Die Frequenzbandbreite dieses Meßaufbaus liegt bei 90 GHz, die erreichbare Ortsauflösung ist besser als 0,5 μm , und die minimal detektierbare Spannung beträgt 2,25 mV. Mit diesem Aufbau werden GaAs- und InP-basierte MMICs qualitativ und quantitativ, ein- und zweidimensional, im Frequenz- wie im Zeitbereich mit der direkten elektrooptischen Meßtechnik charakterisiert und Wellenausbreitungseffekte in diesen Bauelementen untersucht. Zweidimensionale elektrooptische Feldverteilungsmessungen in NLTLs zeigen die Erzeugung von Harmonischen in diesen Bauelementen. Sie zeigen aber auch unsymmetrische Potentialverteilungen auf einer Äquipotentialfläche, die auf eine Konversion der Anregungsmoden in parasitäre Moden hindeutet.

Zur Steigerung der Meßbandbreite des vorhandenen Systems wird im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit der Kurzpuls-Laser durch zwei wellenlängenverstimmbare Erbium-dotierte Ringlaser ersetzt. Erstmals wird dadurch ein optischer Meßplatz realisiert, der zwei cw-Laser einsetzt und komplett in Glasfasertechnik aufgebaut ist. Statt der Sampling-Methode wird nun die Heterodyn-Technik eingesetzt. Sie basiert darauf, daß zwei optische Frequenzen in einem nichtlinearen Prozeß überlagert werden, wodurch zwei neue Frequenzen entstehen: die Summen- und die Differenzfrequenz. Von Bedeutung ist die letztere, die durch geeignete Wahl der Lichtfrequenzen (also der Wellenlängen der beiden Lichtwellen) z.B. zur Erzeugung von Millimeter- und Mikrowellen genutzt werden kann (bei einer Wellenlänge von 1550 nm ergibt eine Wellenlängendifferenz von beispielsweise 0,5 nm eine Differenz- oder Heterodynfrequenz von 62,5 GHz).

In dem hier betrachteten Fall der Meßtechnik zielt die Benutzung zweier cw-Laser darauf ab, den ersten mit dem Mikrowellensignal auf dem DUT erneut über den Pockels-Effekt wechselwirken zu lassen, wodurch auch dies zu einer Summen- und Differenzfrequenz zwischen der Mikrowelle und der optischen Welle des Lasers 1 führt. Setzt man nun den zweiten Laser als Lokoszillator ein, so werden in einem Photodetektor die Mischterme, d.h. die Summen- und Differenzfrequenzen aller nun vorhandenen Frequenzen gebildet. Einer dieser Terme ist die Differenz zwischen dem elektrischen HF-Signal und der Heterodynfrequenz der beiden Laser. Anschaulich heißt dies, daß nun die Heterodyn-Technik, also die Gewinnung der Differenzfrequenz der beiden eingesetzten optischen Wellen, für die Transformation des Mikrowellensignals hin zu niedrigeren Meßfrequenzen sorgt. Der bedeutsamste Unterschied, der sich mit diesem Verfahren ergibt, ist die Tatsache, daß das Phasenrauschen der Meßapparatur von der Stabilität der Laser, jedoch nicht mehr von der zu messenden Mikrowellenfrequenz abhängt. Ein weiterer Unterschied besteht darin, daß die Frequenzbandbreite eines Heterodyn-Meßsystems durch die Wellenlängenverstimmbarekeit der beiden Lichtquellen gegeben ist und nicht mehr durch die Pulsbreite eines gepulsten Lasers. Durch den Einsatz der Glasfasertechnik vereinfacht sich des Weiteren der Meßaufbau, da langwierige Justagearbeiten nun entfallen.

Das erste Ergebnis mit diesem Aufbau lautet jedoch, daß mit den vorhandenen Lasern und Geräten kein elektrooptisch erzeugtes Meßsignal detektiert werden kann. Der Pockels-Effekt bewirkt zwar nur eine sehr geringe Beeinflussung des Mikrowellensignals durch den optischen Abtaststrahl, doch liefert er auch nur Intensitätsmodulationen im Bereich 10^{-3} . Bedingt durch Einkoppelverluste des vom DUT reflektierten und modulierten Lichts in die Glasfaser und bedingt

durch die Kleinheit des Pockels-Effekts ist dieses elektrooptisch erzeugte Meßsignal bei einem Pegel < -92 dBm zu erwarten. Das Rauschniveau des elektrischen Spektrumanalysators ist größer und kann nicht verringert werden, da die benutzten Erbium-dotierten Faserlaser keine phasenstarre Kopplung gestatten. Ihre Frequenzdrift im Laufe einer Messung erfordert einen Span des Spektrumanalysators von mehreren 100 MHz bis 1 GHz, was zu einem Rauschniveau > -85 führt. Ebenso verhindert diese Frequenzdrift den Einsatz eines Lock-In Verstärkers zur Detektion des elektrooptischen Signals.

Als Lösungsweg für ein elektrooptisches Meßsystem in Glasfasertechnik bietet sich der Einsatz eines faseroptischen Verstärkers (*EDFA; Erbium-doped fiber amplifier*) an. EDFAs mit Verstärkungen > 30 dB, jedoch Rauschzahlen < 2 dB, sind auf dem Markt erhältlich. Ein solcher Verstärker würde sich vor allem für den "Rückweg" des Lichts im elektrooptischen Meßaufbau eignen, um dort das elektrooptische Signal zu verstärken. Ebenfalls existieren mittlerweile durchstimmbare Laserdioden mit 100 mW Ausgangsleistung und einer Linienbreite < 100 kHz [130] sowie Gitter-stabilisierte Diodenlaser im Littrow-Design, die über eine optische PLL eine Linienbreite von 1 kHz zeigen und über einen Bereich von 25 GHz (das entspricht 0,2 nm bei einer Wellenlänge von 1550 nm) kontinuierlich verstimmbar werden können [131 - 133]. Beide Optionen sind sehr wichtig, wie diese Arbeit zeigt.

Zur größeren Flexibilität bei der Kontrolle des Polarisationszustandes innerhalb der Pockels-Zelle bieten sich anstelle der faseroptischen Polarisationssteller Kombinationen aus Glasfaser- und Freistrahl-optik an [134]. In diesen wird die Glasfaser kurz unterbrochen, um in diesen "Lücken" Polarisatoren, Strahlteiler, Abschwächer o.ä. zu positionieren. Die Einfügeverluste dieser Komponenten sind < 1 dB spezifiziert.

Die Ergebnisse des dritten realisierten Meßaufbaus verdeutlichen jedoch, daß nicht an der Ausnutzung des Pockels-Effektes festgehalten werden muß. In diesem Meßaufbau wird die Elektroabsorption als Wechselwirkungsmechanismus zwischen Mikrowelle und Laserstrahl angewendet. Die Verluste an optischer Leistung, die die Wiedereinkopplung des reflektierten Lichts in die Glasfaser mit sich bringt, werden umgangen durch die Mischung beider Lichtwellen *und* der Mikrowelle auf dem untersuchten Bauelement. Das DUT wirkt in diesem Meßsystem gleichzeitig als Meßsonde, und das auf ihm erzeugte OBIC-Signal wird direkt von einem elektrischen Spektrumanalysator abgegriffen.

Als Meßobjekt dient eine InP-basierte Koplanarleitung mit einer InGaAs-Absorptionsschicht. Es kann gezeigt werden, daß in dieser Konfiguration

Frequenzen von 36 GHz heterodyn auf eine Meßfrequenz von 2 GHz heruntertransformiert werden können. Das OBIC-Signal hängt dabei ebenso linear von der elektrischen Feldstärke des Mikrowellensignals ab wie es bei der elektrooptischen Meßtechnik der Fall ist. Zweidimensionale Ortsverteilungen des OBIC-Signals einer Mikrowelle mit einer Frequenz von 24,5 GHz, die auf eine Meßfrequenz von 3,7 GHz heruntertransformiert wird, lassen sich ebenfalls erzielen. Aus ihnen lassen sich Mikrowelleneigenschaften des DUT ablesen wie z.B. die Dämpfung der Leitungsstruktur. Dies ist – nach meinem Kenntnisstand – sowohl die höchste Frequenz, die je heterodyn detektiert wurde, als auch die erste Veröffentlichung einer heterodyn gewonnenen zweidimensionalen Aufnahme eines OBIC-Signals in einem HF-Bauelement!

Für die Zukunft ergeben sich damit die folgenden Ausblicke. Wenn der Pockels-Effekt nicht der einzige optoelektronische Effekt ist, der für die schaltungsinterne Hochfrequenzcharakterisierung von MMICs herangezogen werden kann, so sind Meßsysteme denkbar, welche die Vorteile der Heterodyn-Technik (sehr große Meßbandbreite unabhängig von der zu messenden Frequenz), die Vorteile der Glasfasertechnik (sehr hohe Ortsauflösung durch sehr stark getaperte Glasfasern sowie Wegfall des Justierens), die Vorteile der indirekten Meßtechnik (freie Wahl der benutzten Wellenlänge) und die Vorteile elektrorefraktiver oder elektroabsorptiver Effekte (intensivere Wechselwirkung im Gegensatz zum Pockels-Effekt) miteinander verbinden. Je nach Bauelement, welches untersucht werden soll, können entsprechende Meßsonden wie vertikale, elektroabsorptive Modulatoren [83] oder Photodetektoren [116 - 121, 143 - 146] sowie elektrorefraktive Modulatoren aus Vielschichtheterostrukturen [135] unmittelbar auf eine Glasfaser befestigt und als externe Meßsonde ähnlich der indirekten elektrooptischen Meßtechnik in das Streufeld oberhalb des MMIC gebracht werden.

In Bild 6-1 ist die Prinzipskizze eines solchen indirekten, fasergekoppelten Heterodyn-Meßplatzes dargestellt sowie erste Realisierungen einer fasergekoppelten Meßsonde. Bild 6-1b) zeigt eine GaAs-Braggstruktur auf einer Glasfaser [136], Bild 6-1c) ist die REM-Aufnahme eines fasergekoppelten elektroabsorptiven Modulators [137]. Näheres zu dieser indirekten Heterodyn-Meßtechnik findet sich in [138]. Bereits in [139] wird von einem fasergekoppelten GaAs-Sensor berichtet, der als Meßsonde zur Bestimmung des elektrischen Feldes im Raum benutzt wird.

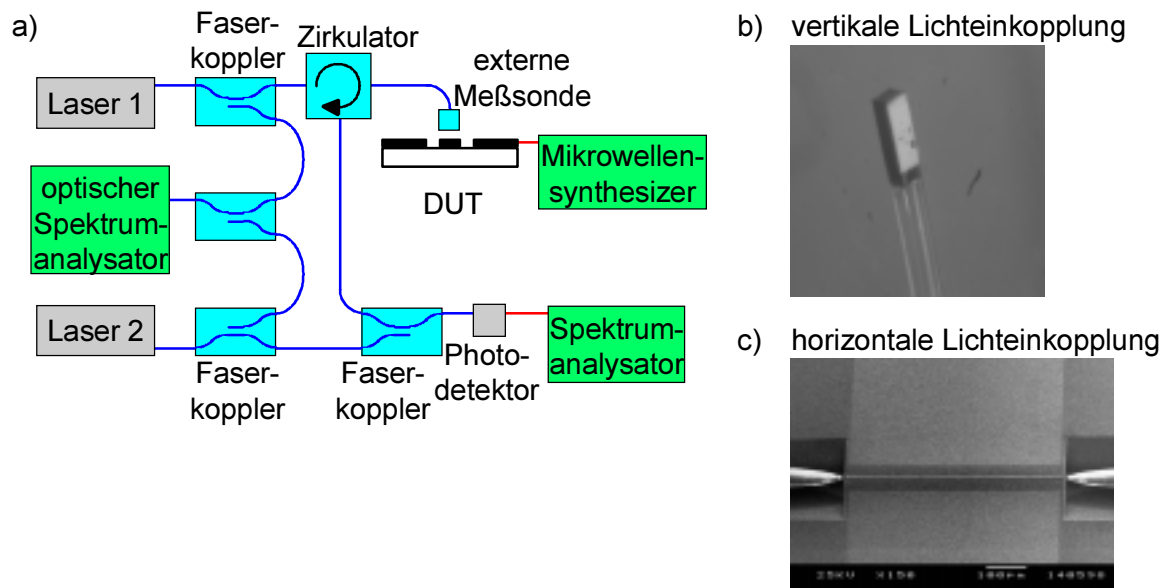


Bild 6-1 Prinzipskizze eines Heterodyn-Meßaufbaus mit externer, fasergekoppelter elektrorefraktiver oder elektroabsorptiver Meßsonde; a) Meßaufbau, b) Foto eines auf eine Multimode-Faser montierten elektrorefraktiven Modulators, c) REM-Aufnahme eines an eine Singlemode-Faser gekoppelten Wellenleitermodulators

Die weitere Aufgabe besteht darin, den qualitativen Ergebnissen quantitative folgen zu lassen. In [16] sind dazu verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, die sowohl einen Vergleich elektrooptischer Meßergebnisse mit Schaltungsgrößen aus der Netzwerkanalyse zulassen als auch den Vergleich zu Werten aus Computersimulationen und feldtheoretischen Berechnungen. Die Übertragbarkeit dieser Verfahrensweisen auf eine heterodyn-elektrooptische oder heterodyn-elektroabsorptive Meßtechnik ist zu prüfen und ggf. anzupassen.

Abschließend kann gesagt werden, daß die optoelektronische Meßtechnik zurecht ein weitverbreitetes "Werkzeug" zur Charakterisierung des Hochfrequenzverhaltens von HF-Bauelementen und -Schaltungen ist. Über die Fülle optoelektronischer Effekte läßt sich eine optimale Anpassung an das zu untersuchende Meßobjekt, an seine Geometrie, Frequenz- und Wellenlängenbereich erzielen. Die Kombination dieser Vielfalt mit der Breitbandigkeit der Heterodyn-Technik darf daher als vielversprechende Meßmethode angesehen werden, aussagekräftige Daten über künftige MMIC-Generationen zu liefern.