

Abschlussbericht des IHP

Zuwendungsempfänger:

IHP GmbH

Förderkennzeichen:

16BP12503

Vorhabenbezeichnung:

Safe and Secure Routing (SASER) – Teilvorhaben: BiCMOS-Technologie & Schaltungstechnik für photonische Anwendungen im Routing

Laufzeit des Vorhabens:

01.11.2012 – 29.02.2016

Autoren:

A. Awny, I. Garcia Lopez, P. Rito, D. Petousi, M. Kroh, S. Lischke, L. Zimmermann

Kontakt:

Lars Zimmermann, IHP GmbH, Im Technologiepark 25, 15236 Frankfurt (Oder), T: +49 335 56 25 407, F: +49 335 56 25 327, E-Mail: lzimmermann@ihp-microelectronics.com

Wissenschaftlich-technische Erkenntnisse

Die Motivation für die Arbeiten im SASER-Projekt hat ihren Hintergrund in der Entwicklung moderner optischer Kommunikationsnetze, insbesondere Transportnetze im Metro- und mittleren Weitverkehr. Dort ist man dabei, die bisher starre Zuordnung optischer Kanäle zu einem festen WDM-Grid (WDM = wavelength division multiplexing) durch eine flexible Grid-Zuordnung zu ersetzen, wodurch die Kapazität erhöht wird und daher zukunftssichere Netze entwickelt werden. Basis für die Entwicklung solcher neuen Architekturen sind flexible, software-unterstützte photonische Bauelemente für kohärente Netze, sog. Multiformat-Transponder (Abbildung 1).

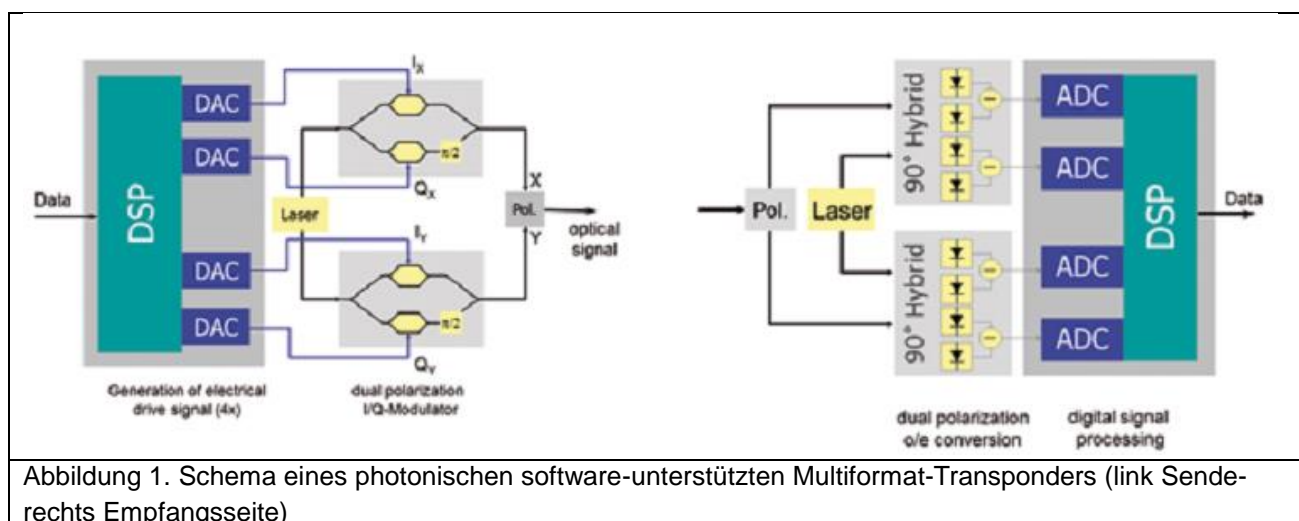


Abbildung 1. Schema eines photonischen software-unterstützten Multiformat-Transponders (link Sende- rechts Empfangsseite)

Dabei handelt es sich im Wesentlichen um optische breitbandige IQ-Modulatoren sowie kohärente Empfänger mit elektrischer Schnittstelle zu schneller Digital-Elektronik (D/A-Konverter und A/D-Konverter). Da die optischen Bauelemente IQ-Modulator und kohärenter Empfänger in allen gängigen Technologien mit Digitalelektronik nicht kompatible Treiberspannungen erfordern, bedeutet dies im Wesentlichen die Integration der Modulatoren und Empfänger mit schnellen elektronischen Treibern. Diesbezüglich wurden beim IHP in SASER zwei verschiedene Technologieansätze verfolgt:

- Entwicklung und Herstellung elektrischer Treiber auf Grundlage der schnellen BiCMOS-Technologie des IHP zur Integration mit InP-basierten Modulatoren (Kooperation mit Finisar und HHI)
- Silizium-Photonik (SiPho), Entwicklung und Herstellung monolithisch mit entsprechender Elektronik

integrierter Modulatoren und kohärenter Receiver auf der Basis von Silizium (Kooperation mit TU Berlin und ADVA Gesamtverbund)

Wegen des unterschiedlichen Entwicklungsgrades der Ausgangstechnologien wurde die Zielstellung bei den zu erreichenden technischen Leistungsparametern unterschiedlich gewählt. Für die Arbeit mit InP-Modulatoren war die Zielstellung Kompatibilität mit 56Gbaud-Systemen, für SiPho-Modulatoren und Empfänger Kompatibilität mit 28Gbaud-System. In beiden Fällen wurde auf am IHP zur Verfügung stehende bzw. in Entwicklung befindliche Technologien zurückgegriffen. Bei der SiPh-Technologie handelt es sich um eine neuartige, weltweit bislang einzigartige Technologie, die schnelle BiCMOS-Elektronik im Frontend mit leistungsfähigen SiPh-Bauelementen verbindet. Wir nennen diese Technologie photonische BiCMOS. Für diese neue Technologie, die sich zu Beginn von SASER in einer frühen Entwicklungsphase befand, waren umfangreiche grundlegende und unterstützende Arbeiten notwendig:

- Erarbeitung theoretischer und numerischer Grundlagen zur Analyse des zentralen Bauelements Mach-Zehnder-Modulator,
- Voll BiCMOS-kompatible Germanium Fotodiode,
- Schaffung der opto-elektronischen Wafer-Mess-Fähigkeit
- Schaffung der Design-Kit-Umgebung
- Opto-elektronisches Co-Design

In den folgenden Abschnitten werden die wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse, die zu den oben genannten Punkten im Rahmen des SASER-Vorhabens gewonnen wurden, zusammengefasst. Abschließend erfolgt eine in die Zukunft schauende Bewertung der Arbeiten.

Silizium-photonische Modulatoren

Innerhalb des Berichtszeitraums konnte das IHP in Zusammenarbeit mit der TU Berlin ein wirklich umfangreiches Verständnis von Phasenschiebern auf Grundlage rückwärts vorgespannter PN-Wellenleiterdioden gewinnen. Dieses Wissen konnte durch umfangreiche numerische Analysen auf Seiten der TU Berlin gewonnen werden, die mit am IHP hergestellten Phasenschieberstrukturen verifiziert wurden. Bezüglich der Leistungsfähigkeit sind einige CW-Charakteristiken sehr wichtig, entscheidend sind letztlich aber die Eigenschaften bei hohen Frequenzen (>10GHz). Das wichtigste Materialsystem, welches im Bereich Modulatoren im Wettbewerb mit Silizium steht, ist InP. Es ist daher nützlich, Vergleiche zu InP-Modulatoren zu machen. Die wesentlichen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen. Einfache Phasenschieber können mit Halbleitertechnologie in Si-Wellenleitern mit PN-Übergängen realisiert werden, je höher die Dotierung, desto höher ist die Phasenschieber Effizienz (kleineres $V_{\pi}L$). Realistisch für solche Geometrien sind jedoch $V_{\pi}L$ im Bereich 1-4Vcm. Damit sind die zum Erreichen eines gewissen V_{π} notwendigen Phasenschieberlängen vorgegeben. Aufgrund der Effizienz der Ladungsträgerdispersion in Si führt dies zu relativ langen Phasenschiebern (einige mm). Der klassische Modulator-Typ Mach-Zehnder-Modulator (MZM) mit Wanderwellenelektrode hat aufgrund dieser Tatsache beträchtliche Performance-Einbußen. Dies ist in Abbildung 2 illustriert.

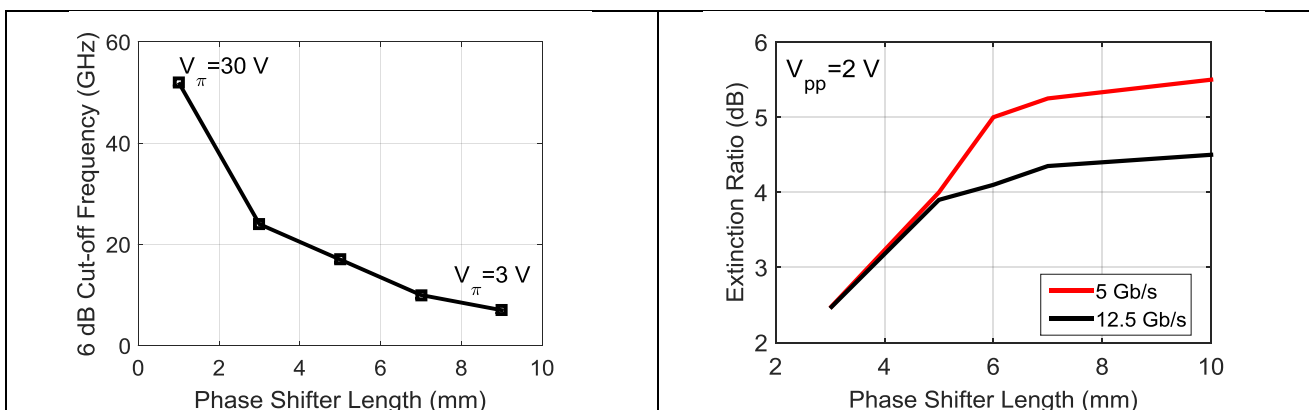


Abbildung 2 Abhängigkeit der elektrischen Bandbreite (links) und des Auslöschungsverhältnisses (rechts) von der Phasenschieberlänge. Typischer Phasenschieber.

Um die gewünschten kleinen Treiberspannungen zu erzielen, müsste man bei Si-MZMs Phasenschieber großer Länge und daher geringer Bandbreite in Kauf nehmen. Dieser Effekt lässt sich durch Entkopplung der Phasenschieberkapazität von der Elektrode erzielen. Deswegen kommen für Si-MZM auch weniger effiziente Phasenschieber, d.h. mit geringer Dotierung in Frage. Unter dieser Voraussetzung hat sich aufgrund der Untersuchungen in SASER ergeben, dass Si-Phasenschieber ähnliche CW-Spezifikationen wie InP-basierte Phasenschieber erreichen können, jedoch ist aufgrund der geringeren Effizienz des Ladungsträgerdispersionseffekts von 4-8x längeren Phasenschiebern in Si auszugehen. Die gute Nachricht hierbei lautet also, dass kleine Treiberspannungen ($<2V$), geringe Einfügeverluste und Chirpunterdrückung mit Si-MZMs möglich sein sollte. Optimierte Si-MZMs sollten nicht mehr als 2-3 zusätzliche dB Einfügeverluste im Vergleich zu InP-MZM aufweisen, im Wesentlichen bedingt durch etwas höhere Phasenschieberverluste und die in Si leider noch immer höheren Einkoppelverluste. Im Vergleich zu InP-MZMs ist anzumerken, dass Si-Phasenschieber keine Wellenlängenabhängigkeit aufweisen und auch nur sehr schwach temperaturabhängig sind.

Nach der CW-Analyse wurden von uns die Hochfrequenzeigenschaften silizium-photonischer MZMs numerisch untersucht. Dabei wurde, im Gegensatz zu bisherigen Studien, die dem System geschuldete Randbedingung niedriger Treiberspannung in den Mittelpunkt der Betrachtungen gestellt. Zentrales Ergebnis ist die Abschätzung des Trade-offs zwischen Phasenschieberverlusten und erreichbarer Bandbreite bei konstantem V_{π} , wobei diese Abschätzung für Wanderwellen-Bauelemente unternommen wurde. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3 dargestellt.

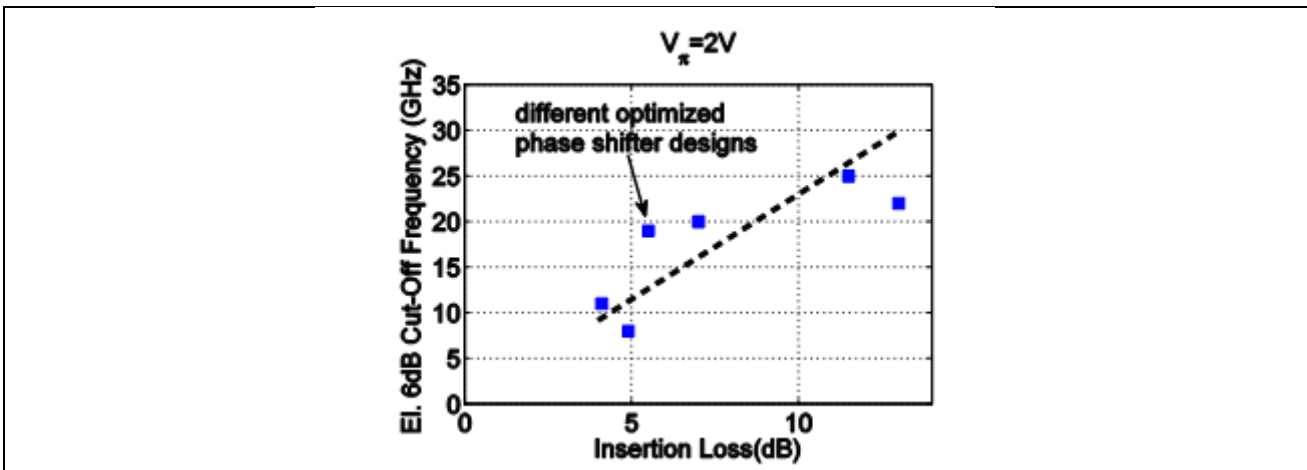


Abbildung 3 Gegenüberstellung von Phasenschieberbandbreite und Einfügeverlusten für ausgewählte simulierte Phasenschieber mit Wanderwellenelektroden. Wir gehen davon aus, dass etwa 3-4GHz/dB für derartige Bauelemente die Regel ist.

Wanderwellen-Modulatoren sind daher nur in begrenztem Umfang mit den Systemvorgaben für kohärente Übertragungssysteme kompatibel, die Bauelemente weisen zu hohe Verluste auf.

Schnelle Germanium Fotodioden

Innerhalb des Vorhabens wurden die Germanium-Fotodioden kontinuierlich weiterentwickelt und definieren mittlerweile den Stand der Technik in diesem Bereich (siehe Abbildung 4). Durch ein neues Design des Bauelements konnten wesentlich verbesserte Charakteristiken erzielt werden. Dabei bestand ein zentraler Schritt in der beidseitigen Beschränkung stark dotierter Germanium-Gebiete, die vermutlich Diffusionsbeiträge zum Fotostrom liefern, die deutlich verschlechternde Auswirkungen auf die Bandbreite der Diode aufweisen. Gleichzeitig wurden mit dem neuen Design höhere Stromausbeuten erzielt. Die neuen Dioden erzielen $>70\text{GHz}$ 3dB Bandbreite und etwa 1A/W interne Quanteneffizienz. Der Dunkelstrom, der hier nicht aufgetragen wurde, bewegt sich im Bereich $<100\text{nA}$ bei Raumtemperatur.

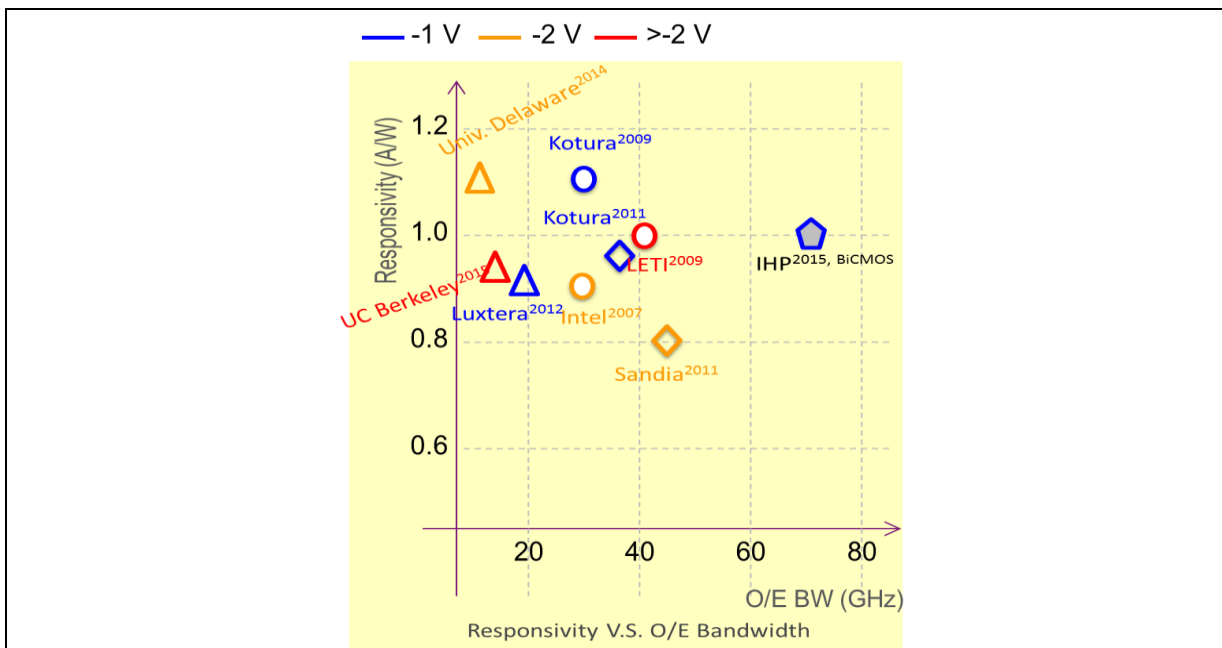


Abbildung 4 Übersicht bezüglich publizierter Germanium Fotodioden. Aufgetragen wurde die Quantenausbeute (Responsivity A/W) bei 1550nm über der 3dB OE-Bandbreite. IHP-Dioden erzielen gleichzeitig hohe Responsivity und hohe Bandbreite.

Entwicklung Process-Design Kit für Si-Photonik Technologien

Zu Beginn des SASER-Vorhabens war noch nicht klar, wie ein praktisches Process-Design Kit (PDK) für eine Si-Photonische Technologie konzipiert sein müsste. Zunächst sollten von technologischer Seite Vorarbeiten zum PDK geliefert werden. Die Schwierigkeit hierbei war jedoch, dass sich notwendige Erkenntnisse erst im Zuge der technologischen und der Bauelemententwicklung ergaben. Dies betraf:

- Vorgabe von Design-Rules (kritische Größen, Filler-Regeln, Density-Regeln, etc)
- Vorgabe von Prozessspezifikationen (Wellenleiterverluste, Schicht-Widerstände, etc)
- Ausarbeitung wichtiger Bauelementmodelle für Frequenz- und Zeitbereich-Simulationen

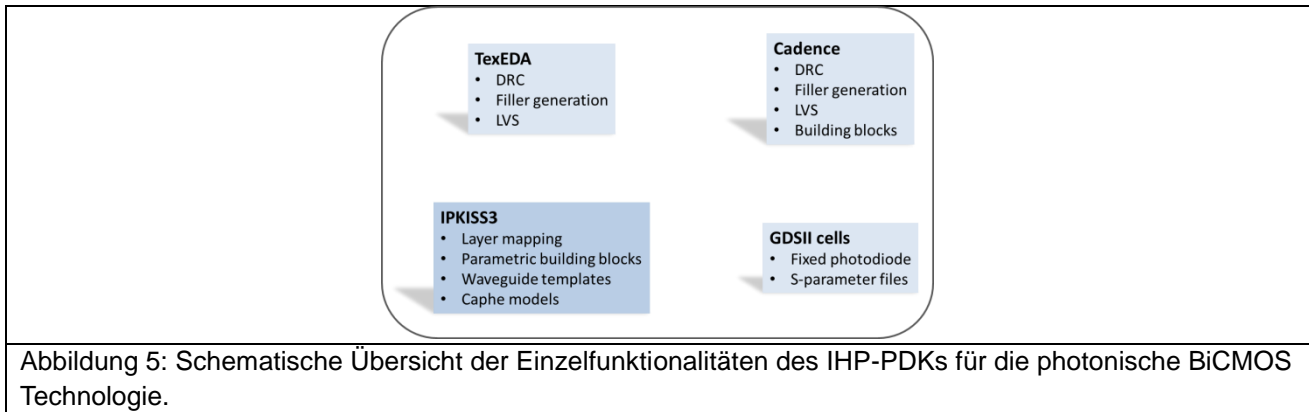
Da diese Vorarbeiten jedoch aufgrund der Dauer der technologischen Entwicklung selbst erhebliche Zeit in Anspruch nahmen, wurde im SASER-Vorhaben von uns ein Dummy-Ansatz verfolgt. Design-Regeln, Prozessspezifikationen und Bauelement-Modelle wurden, soweit möglich, mit theoretischen bzw. plausiblen Annahmen gefüllt. Die entsprechenden Dokumente wurden als Living-Documents definiert, wobei ein Qualitäts-Management-Prozess für Änderungen bzw. Fehleranalyse eingeführt wurde.

Aufgrund von technischen und organisatorischen Vorüberlegungen hat man sich am IHP entschlossen, den Entwicklungsprozess mehrstufig zu gestalten. Es sollte für den PDK im Wesentlichen das gleiche Verfahren bei der PDK-Entwicklung zum Tragen kommen wie bereits früher bei elektronischen PDKs, einschließlich der Implementierung.

- Stufe 1: Implementierung der wesentlichen Funktionalität für Layout-Erstellung in TexEDA, Ausarbeitung einer ersten Bibliothek photonischer Bauelemente in IPKISS2 (wegen existierender Vorarbeiten).
- Stufe 2: Überführung der Layout-Funktionalität nach Cadence (Standard-Software für die elektronischen Technologien) und Implementierung der photonischen Bauelementbibliothek in IPKISS3, Implementierung der Modelle

Die folgende Abbildung zeigt schematisch den Stand des PDKs am Ende des SASER-Vorhabens. Die Definition der Basis-Funktionen erfolgt in TexEDA und wird dann nach Cadence portiert. Es wurde eine

IPKISS3 Bauelementbibliothek erstellt und GDS-Zellen für den direkten Zugriff in Cadence bereitgestellt.



On-Wafer opto-elektronische Charakterisierung

Zu Beginn des Vorhabens stand am IHP noch kein Setup für opto-elektronische On-Wafer-Messungen zur Verfügung. Entwicklung und Aufbau eines solchen Setups waren von zentraler Bedeutung für die gesamte opto-elektronische Technologieentwicklung am IHP.

Der klassische Ansatz, der auch heute noch für viele optische Transponder verwendet wird, besteht aus getrenntem Testen von photonischen und elektrischen Komponenten (nach Möglichkeit auf dem Wafer) und anschließendem opto-elektronischen Test im Modul, also nach der Aufbautechnik. In der Siliziumtechnologie soll dieser kostspielige Ansatz vermieden werden und stattdessen das opto-elektronische Testen der integrierten Systeme gleich auf dem Wafer durchgeführt werden.

Auch in unserem Teilvorhaben von SASER hatte die neue Messtechnik daher einen Schwerpunkt. Das Opto-elektronische On-Wafer-Messen erforderte verschiedene Neuentwicklungen:

- Prober/Tester mit Ausstattung zum Ausrichten elektrischer und optischer Messköpfe
- Optische Singel-Mode-Probenköpfe (auf Basis von Faser-Arrays)
- Probekopf-Bewegung mit Sub-Mikrometer Genauigkeit
- Automatisches Ausrichten optischer Messköpfe
- Kombination mit HF-Messtechnik
- Entwicklung opto-elektronischer Messroutinen und Integration in Datenbank-System

Diese sind so z.T. heute noch nicht auf dem Markt verfügbar, d.h. es musste durchweg Eigen- oder Fremdentwicklung in Abstimmung mit dem jeweiligen Hersteller durchgeführt werden. Bis auf das automatische Ausrichten konnte innerhalb des Berichtszeitraums bei allen Punkten die Machbarkeit demonstriert werden.

In der zweiten Hälfte des SASER-Vorhabens wurde am IHP mit PCM-Messungen (process control monitoring) silizium-photonischer Abläufe begonnen. Der Setup hat erhebliche Komplexität erreicht (siehe Abbildung 6).

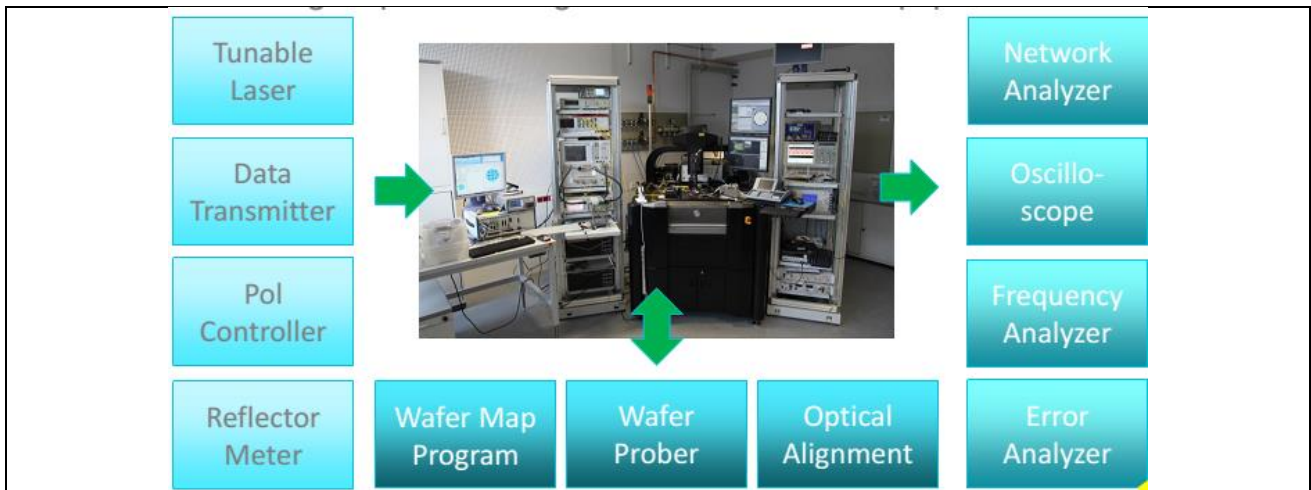


Abbildung 6 Im Rahmen von SASER am IHP aufgebauter opto-elektronischer On-Wafer-Messplatz

Der in Abbildung 6 gezeigte Setup wird im Wesentlichen für opto-elektronische HF-Messungen verwendet (OE S-Parameter, Großsignal-Analyse). Ein weiteres Setup steht für DC-Messungen zur Verfügung. Auf diesem werden Fotodioden und passive optische Bauelemente charakterisiert. Typischerweise werden auf jedem Wafer 9 Chips untersucht und das Ergebnis in einer Datenbank abgespeichert, um es für spätere statistische Analysen verwenden zu können. Zur Illustration hier ein Beispiel für eine 9-Chip-Messung der linearen Wellenleiterverluste (Abbildung 7). In SASER wurden hierzu die Teststrukturen, die Messroutinen und die Abspeicherung in der Datenbank entwickelt.

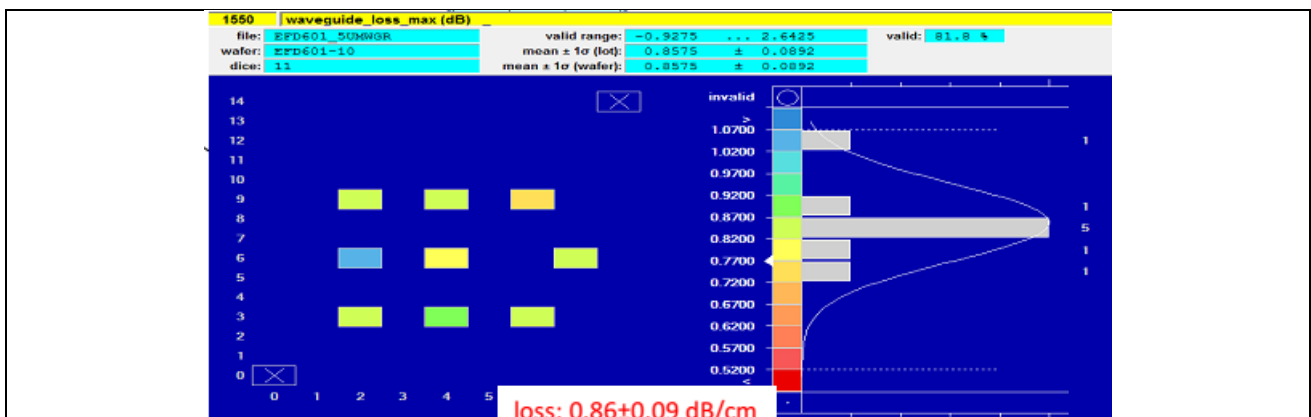


Abbildung 7 Beispiel für eine am IHP durchgeführte 9-Punkt-Messung der Wellenleiterverluste.

Opto-elektronische Schalungen in photonischer BiCMOS

Innerhalb des Projektzeitraums wurde eine große Anzahl photonischer und photonisch-elektronischer Schalungen auf Silizium realisiert. Es handelte sich dabei jedoch im Wesentlichen um Demonstrations-Vehikel und Technologietests und nicht um für den Einsatz im System spezifizierte Schalungen. Auf der Senderseite konnten die theoretisch vorhergesagten Vorteile einer Entkopplung von Signalelektrode und Phasenschieber gezeigt werden. Bei dem Demonstrator handelt es sich um einen Mach-Zehnder Modulator mit segmentiertem Treiber (Abbildung 8).

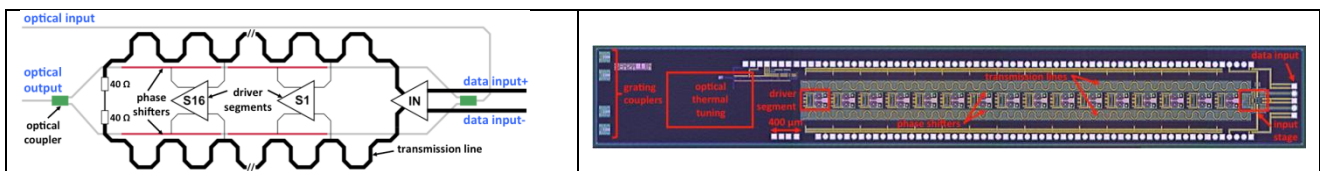


Abbildung 8 Prinzipskizze des segmentierten Mach-Zehnder Modulators (links) Chip-Bild des MZMs, optische Kopplung auf der linken Seite, HF-Signale auf der rechten.

Der Treiber wurde als linearer Treiber entworfen, um die Verwendbarkeit des Chips in kohärenten Systemen mit D/A-Wandlern sicher zu stellen. Die Phasenschieberlänge von mehr als 6mm wäre für Wanderwellen-MZMs bereits kritisch, sollten Anwendungen mit mehr als 10GHz angestrebt werden. Der in SASER entworfene und realisierte MZ-Modulator zeigt hingegen deutlich verbesserte Leistungsparameter (Abbildung 9).

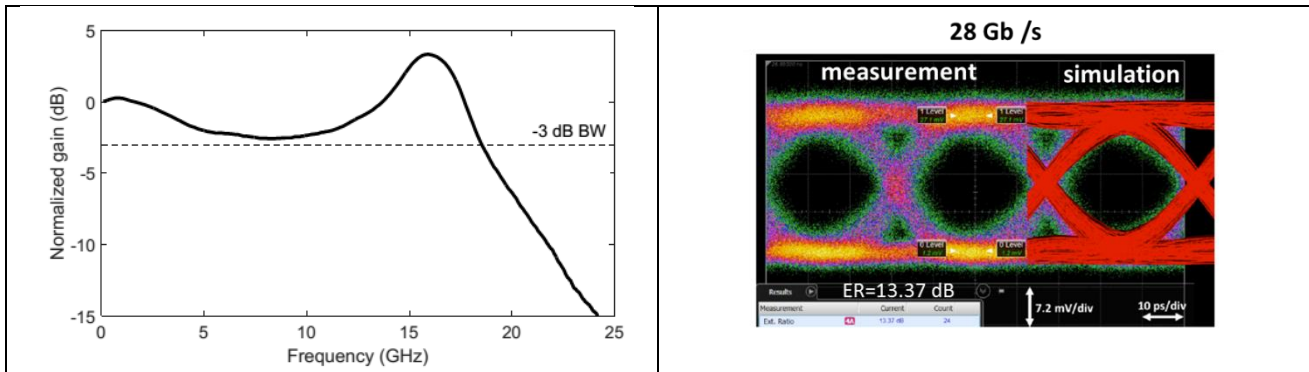


Abbildung 9 Opto-elektronische S21-Messung des segmentierten MZMs (Bild links). Es wurden 18GHz Bandbreite erzielt. Bit-Muster-Messungen (lange Bit-Folge) bei 28Gb/s (Bild rechts). Es wurden sehr hohe Auslöschungsverhältnisse (>13dB) erzielt.

In der folgenden Tabelle werden die Testergebnisse des IHP-Devices mit denen der derzeitigen Stand der Technik (Silizium-Photonik) verglichen. Die Betrachtung zeigt eindeutig die Stärken der Integration mit BiCMOS-Technologie. Durch den hohen zur Verfügung stehenden Spannungshub lässt sich der MZM deutlich weiter aussteuern, als bei IBM. Wegen des hohen Spannungshubs ist dann aber auch der Energieverbrauch des IHP-Modulators deutlich höher, als bei den anderen MZMs.

Tabelle 1 Direkter Vergleich mit derzeit wichtigsten photonisch-elektronischen Modulatoren

Ref.	Technology	Data-rate (Gbaud)	OOK / Linear	MZM type (efficiency $V\pi L$)	MZM length (mm)	Driver output swing (V_{ppd})	IQ	ER (dB)	Power (W)
IBM	90 nm CMOS	16	OOK	Si depletion (1.67 Vcm)	3	3.4 ($< V\pi$)	No	10.4	0.278
Cisco	0.13 μm BiCMOS	32	Linear	Si MOS (0.2 Vcm)	-	-	Yes	-	0.9
IHP	0.25 μm BiCMOS	28*	Linear	Si depletion (2.9 Vcm)	6.08	4 ($\sim V\pi$)	No	13	1.8

Mehrere monolithische Empfängerschaltungen auf Basis von Germanium-Fotodioden wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelt und realisiert. Es wurde bereits gesagt, dass IHP Ge-Dioden den Stand der Technik definieren. Die besondere Herausforderung an der monolithischen Variante ist natürlich, auf Seiten des BiCMOS-Prozesses aufgrund der Integration von Germanium keine Kompromisse eingehen zu müssen. Dass dies gelungen ist, demonstrieren die im SASER-Projekt realisierten monolithischen Empfängerschaltungen.

Ein single-pol QPSK-Empfänger bis 28Gbaud wurde in SASER entwickelt und hergestellt. Eine Fotografie des Chips ist in Abbildung 10 gezeigt.

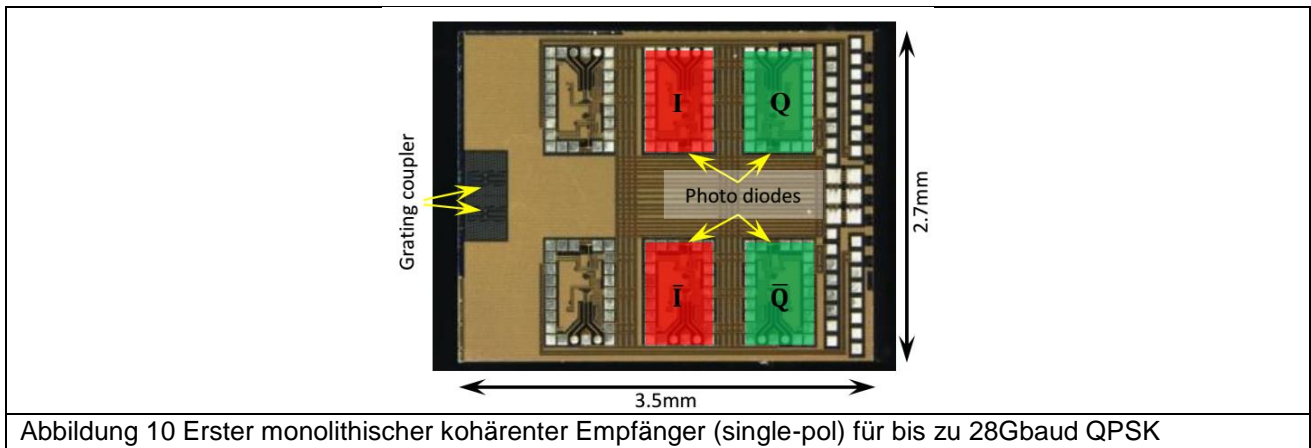


Abbildung 10 Erster monolithischer kohärenter Empfänger (single-pol) für bis zu 28Gbaud QPSK

Im Wesentlichen diente der Chip dazu, die erfolgreiche Integration von photonischen und elektronischen Bauelementen auch in komplexen Schaltungen wie einem kohärenten Empfänger zu demonstrieren, wie in Abbildung 11 gezeigt.

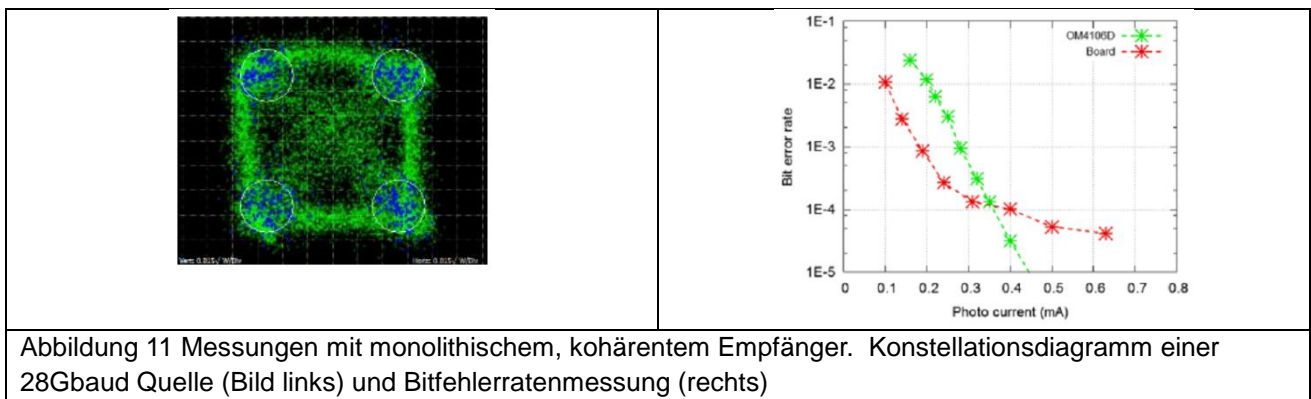


Abbildung 11 Messungen mit monolithischem, kohärentem Empfänger. Konstellationsdiagramm einer 28Gbaud Quelle (Bild links) und Bitfehlerratenmessung (rechts)

Die Leistungsparameter des 28Gbaud Empfängers reichen natürlich nicht mehr an den Stand der Technik heran, mittlerweile wurden silizium-photonische kohärente Empfänger – wenn auch hybrid – mit 30GHz Bandbreite gezeigt. Aus diesem Grund wurde ein neues Verstärker-Design entwickelt, mit deutlich weiterreichender Bandbreite (30GHz und in diesem Sommer 36GHz). Diese Systeme sind kompatibel mit Übertragungsraten bis zu 56Gbaud.

Treiber für InP-basierte Modulatoren

Entsprechend den technischen Spezifikationen der Projektpartner HHI und Finisar wurden Schaltungen für verschiedene Modulatorkonzepte entworfen und am IHP hergestellt. Es handelte sich dabei um Schaltungen in SG13-Technologie. Im Einzelnen wurden folgende Schaltungen entworfen:

- Linearer Treiber für segmentierten InP-Modulator 16-Segmente
- Linearer Treiber für segmentierten InP-Modulator 8-Segmente
- Abstimmbare Delay-Line mit Abstimmbereich $\pm 15\%$
- Linearer Treiber für 25Ω Wanderwellen-MZMs bis zu 40 Gb/s (OFDM-Treiber)
- Sinus-Treiber bei $19\text{GHz} \pm 0.75\text{ GHz}$ mit 4Vpp bei einer Ausgangsload von $25\ \Omega$
- Segmentierter Treiber mit integrierter 4-bit DAC-Funktionalität

Alle Schaltungen wurden realisiert und am IHP erfolgreich elektrisch getestet. Rückmeldung von den Kooperationspartnern (Postdeadline Paper OFC 2016) zeigt, dass IHP-Treiber den Stand der Technik repräsentieren.

Bewertung der Ergebnisse und Ausblick

Die Entwicklung einer monolithisch photonisch-elektronischen Technologie war eine große Herausforderung, die das IHP ohne die Arbeiten im Forschungsverbund SASER nicht in diesem Zeitrahmen hätte meistern können. Mittlerweile ist die photonische BiCMOS ein internationales Alleinstellungsmerkmal des IHP und der deutschen photonischen Technologielandschaft. Jedoch befindet sich die Technologie nach wie vor in der Entwicklung, weitere Anstrengungen sind notwendig, um die photonische BiCMOS-Technologie auf den Stand wie die elektronischen Technologien des IHP zu heben. Insbesondere bedarf es nun einer näheren Zusammenarbeit mit Industriepartnern, um wirklich anwendungsspezifische Aspekte in den Mittelpunkt der Entwicklung zu stellen. Die im Anschluss an SASER erfolgte Fortführung der Silizium-Photonik-Aktivitäten im Projekt SPEED zielt genau auf sowohl für das IHP als auch industrielle Kunden relevante Fragestellungen (Packaging-Schnittstellen, Einfügeverluste, Umsetzung echter Transceiver-Designs), die dringend beantwortet werden müssen. Obwohl es sich bei der Silizium-Photonik eindeutig um eine Vorfeldtechnologie handelt, nehmen wir eine Beschleunigung der Entwicklung und zunehmend anspruchsvolleres kommerzielles Interesse an der Technologie wahr. Von unserem gegenwärtigen Kenntnisstand ausgehend, erscheint die Silizium-Photonik mit Sicherheit im 100G Bereich von Bedeutung zu sein. Ob die Technologie auch bei 400G Anwendungen erfolgreich sein kann, hängt unserer Meinung nach sehr stark von technologischen Fragestellungen ab. Momentan ist noch nicht klar, ob 40GHz Bandbreite bei Si-MZM unter vernünftigen Randbedingungen wirklich möglich sein werden. Simulationen mit optimierten Device-Parametern deuten dies an, bedürfen aber der technologischen Verifikation.

Publikationen des IHP

1. S. Lischke, D. Knoll, L. Zimmermann, Y. Yamamoto, M. Fraschke, A. Trusch, A. Krüger, M. Kroh, and B. Tillack; *Low Dark Current Ge PIN Photodiode for a High-Performance, Photonic BiCMOS Process for Radio-over-Fiber Applications*, Photonics Conference (IPC), IEEE, 628 - 629, 2012
2. D. Petousi, L. Zimmermann, K. Voigt, and K. Petermann; *Performance Limits of Depletion-Type Silicon Mach-Zehnder Modulators for Telecom Applications*, Journal of Lightwave Technology, 31 (22), 3556 - 3562, November 15, 2013
3. S. Lischke, B. Wohlfeil, D. Knoll, L. Zimmermann, C. Mai, Y. Yamamoto, S. Marschmeyer, K. Voigt, Tillack; *High-efficiency Grating Couplers for Integration into a High-performance Photonic BiCMOS Process*, Proc. Asia Communications and Photonics Conference (ACP-2013), (2013)
4. Wohlfeil, Benjamin; Stamatiadis, Christos; Zimmermann, Lars; Petermann, Klaus; *Compact Fiber Grating Coupler on SOI for Coupling of Higher Order Fiber Modes*, paper OTh1B.2, OFC 2013, Anaheim, USA
5. Petousi, Despoina; Zimmermann, Lars; Voigt, Karsten; Kreissl, Jochen; Petermann, Klaus; *Comparison of InP and Silicon Mach-Zehnder Modulators in Terms of Chirp*, paper P.2.7, ECOC, 2013, London
6. L. Zimmermann et al, *Monolithically Integrated 10Gbit/sec Silicon Modulator with Driver in 0.25 μ m SiGe:C BiCMOS*, paper We.3.B.1, ECOC, 2013, London
7. L. Zimmermann et al; *Modulator Integration in High-Performance BiCMOS*, paper ThC3, IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2013, Seoul, Korea
8. I. García-López, D. Micusik and L.Zimmerman, *A 2.5 Vpp broadband linear driver core with 32 GHz bandwidth for segmented InP Mach-Zehnder modulators*, ICECS 2014.
9. I. García-López, P. Rito, D. Micusik, J. Borngräber and L.Zimmerman, *A 2.5 Vppd broadband 32 GHz BiCMOS linear driver with tunable delay line for InP segmented Mach Zehnder modulators*, IMS 2015.
10. P. Rito, I. García López, D. Micusik, J. Borngräber and L. Zimmermann, *A 40 Gb/s 4 Vpp IQ Modulator Driver in 0.13 μ m SiGe:C BiCMOS Technology for 25 Ω Mach Zehnder Modulators*, IMS 2015.

11. Wohlfeil, B. ; Stamatiadis, C. ; Jager, M. ; Zimmermann, L. ; Burger, S. ; Petermann, K.; *Integrated optical fiber grating coupler on SOI for the excitation of several higher order fiber modes*, paper, ECOC 2014, Cannes
12. Zimmermann, L. ; Petousi, D. ; Knoll, D. ; Lischke, S. ; Richter, H. ; Winzer, G. ; Thomson, D.J. ; Gardes, F.Y. ; Hu, Y. ; Reed, G.T. ; Goll, B. ; Porte, H. ; Voigt, K. ; Petermann, K. ; Tillack, B.; *Linear modulators in photonic BiCMOS technology*, IEEE Photonic Conference, 2014, San Diego
13. Zimmermann, L. ; Knoll, D. ; Lischke, S. ; Petousi, D. ; Kroh, M. ; Winzer, G. ; Heinemann, B. ; Ostrovskyy, P. ; Micusik, D. ; Lisker, M. ; Fursenko, O. ; Marschmeyer, S. ; Yamamoto, Y. ; Voigt, K. ; Wohlfeil, B. ; Tillack, B. ; Petermann, K., *Monolithic integration of photonic devices in SiGe BiCMOS*, IEEE Group IV Photonics, 2014, Paris
14. Lischke, S. ; Knoll, D. ; Zimmermann, L. ; Scheit, A. ; Mai, C. ; Trusch, A. ; Voigt, K. ; Kroh, M. ; Kurps, R. ; Ostrovskyy, P. ; Yamamoto, Y. ; Korndorfer, F. ; Peczek, A. ; Winzer, G. ; Tillack, B.; *High-speed, waveguide Ge PIN photodiodes for a photonic BiCMOS process*, IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), 2014, San Diego
15. Knoll, D. ; Lischke, S. ; Zimmermann, L. ; Heinemann, B. ; Micusik, D. ; Ostrovskyy, P. ; Winzer, G. ; Kroh, M. ; Barth, R. ; Grabolla, T. ; Schulz, K. ; Fraschke, M. ; Lisker, M. ; Drews, J. ; Trusch, A. ; Kruger, A. ; Marschmeyer, S. ; Richter, H.H. ; Fursenko, O. ; Yamamoto, Y. ; Wohlfeil, B. ; Petermann, K. ; Beling, A. ; Zhou, Q. ; Tillack, B.; *Monolithically integrated 25Gbit/sec receiver for 1.55 μ m in photonic BiCMOS technology*, OFC, 2014, San Francisco
16. G. Winzer et al, "Monolithic photonic-electronic QPSK receiver for 28Gbaud", Proc. OFC 2015, Los Angeles
17. I. García López , P. Rito, D. Micusik, A. Aimone, T. Brast, M. Gruner, G. Fiol, A. G. Steffan, J. Borngräber, L. Zimmermann, D. Kissinger, A. C. Ulusoy, "High speed BiCMOS linear driver core for segmented InP Mach-Zehnder modulators" . Analog Integrated Circuits and Signal Processing 12/2015; DOI: 10.1007/s10470-015-0666-0..
18. I. García López, P. Rito, L. Zimmermann, D. Kissinger and A. C. Ulusoy, "A 40 Gbaud SiGe:C BiCMOS Driver for InP Segmented MZMs with Integrated DAC Functionality for PAM-16 Generation" . IMS 2016
19. P. Rito, I. García López, D. Petousi, L. Zimmermann, M. Kroh, S. Lischke, D. Knoll, D. Kissinger and A. C. Ulusoy, "A Monolithically Integrated Segmented Driver and Modulator in 0.25 μ m SiGe:C BiCMOS with 13 dB Extinction Ratio at 28 Gb/s" . IMS 2016