

Abschlußbericht
1.4. 1994 - 31.3. 1998

zum

Teilvorhaben
"Höchstfrequente Empfänger-OEICs auf InP-Basis"

(Förderkennzeichen 01 BP 431/7)

im Förderschwerpunkt

PHOTONIK

"Optische Kommunikationssysteme (Hochbitratenübertragung)"

Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin GmbH

September 1998

Abschlußbericht zum Teilvorhaben

"Höchstfrequente Empfänger-OEICs auf InP-Basis"

(Förderkennzeichen 01 BP 431/7)

Projektlaufzeit: 1.4. 1994 - 31.3. 1998

Berichtszeitraum: 1.4. 1994 - 31.3. 1998

Leiter des Teilvorhabens

Abteilungsleitung

(Dr.-Ing. H.-G. Bach)

(Dr. U. Niggebrügge)

Institutsleitung

(Prof. Dr. C. Baack)

(Dr. W. Grunow)

Höchstfrequente Empfänger-OEICs auf InP-Basis (FKZ 01 BP 431/7)

Projektleiter: Dr.-Ing. Heinz-Gunter Bach

Bearbeiter: Dr.-Ing. H.-G. Bach, G.G. Mekonnen, W. Passenberg, W. Schlaak, Dr. C. Schramm, A. Seeger, R. Steingrüber, Dr. H. Engel (zeitweise), A. Umbach, G. Unterbörsch

im FuE Unterauftrag: Universität -GH- Duisburg, FG Halbleitertechnik / Halbleitertechnologie: S. van Waasen, Dr. R.M. Bertenburg, Prof. F.J. Tegude

Inhaltsverzeichnis

- Zusammenfassung
- Zielstellung
- Wissenschaftlich-technische Ergebnisse
- Zusammenarbeit mit Industrie-Partnern
- Wertung des Erkenntnisfortschritts, Ausblick
- Ausgründungen des HHI
- Veröffentlichungen

Zusammenfassung

Es ist im Teilvorhaben zusammen mit dem Unterauftragnehmer gelungen, Empfänger-OEICs, bestehend aus einer wellenleiter-integrierten Photodiode und einem Wanderwellenverstärker, mit Bandbreiten von 28 GHz für die 20 Gbit/s-Projektzwischenstufe und mit > 35 GHz Bandbreite für die 40 Gbit/s Zieldatenrate herzustellen. Das im Projekt von Anfang an angewandte Wanderwellenverstärkerkonzept konnte für Breitbandempfänger für Hoch-Bitratenanwendungen bei geringsten linearen Verzerrungen erfolgreich demonstriert werden und wird inzwischen auch bei konkurrierenden Labors wie NTT, Japan eingesetzt. Ausgewählte OEICs wurden jeweils in Modulen aufgebaut und an Industriepartner (Siemens AG, München und Alcatel SEL AG, Stuttgart) für Systemtests abgegeben, in denen die Eignung der neuentwickelten Photoempfänger für 20/40 Gbit/s-TDM-Systeme nachgewiesen wurde.

Für zukünftige optimierte 40 Gbit/s-Empfänger wurde ein neuer Maskensatz mit kaskadierten Verstärkern, basierend auf Kaskodenstufen und integrierter Bias-Einspeisung, erfolgreich prozessiert.

Die entwickelten Prototyp-Photodioden und -Photoempfänger werden für konkrete Systemanforderungen für mehrere Industriepartner im Verbundprojekt KomNet weiterentwickelt und für 40 Gbit/s TDM-Übertragungs-Feldversuche eingesetzt werden.

Zielstellung

Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung hochratiger Empfänger-OEICs (40 Gbit/s) auf InP-Basis für den Wellenlängenbereich um 1,55 µm für optische Nachrichtensysteme mit schneller Zeitmultiplex-Technik auf Basis Synchroner Digitaler Hierarchie (SDH). Bei der am HHI zusammen mit dem FuE-Unterauftragnehmer Universität -GH- Duisburg, FG HLT, durchgeführten Entwicklung von Empfänger-OEICs werden ein optischer Eingangswellenleiter, eine Photodiode und mehrere High-Electron Mobility Transistoren (HEMT) miteinander monolithisch integriert. Parallel zur OEIC-Entwicklung war eine höchstfrequente optoelektronische Modultechnik zum Packaging der OEICs zu entwickeln und eine elektrisch und optisch charakterisierende Meßtechnik für Bandbreiten > 50 GHz bereitzustellen.

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Übersicht

Die Arbeiten im Themenfeld der Entwicklung von Höchstfrequenz-Photoempfängern umfassen die Begründung des gewählten Integrationsansatzes für Breitband-Photoempfänger, bestehend aus der Integration von wellenleiter-integrierten Photodioden mit Wanderwellenverstärkern, die Ausarbeitung eines entsprechenden OEIC-Integrationskonzepts (Hybrid-Epitaxie mittels MOVPE und MBE), eine MBE-Prozeßentwicklung (Überwachsen von MOVPE-Wellenleiterschichtenpaketen), die Entwicklung von Basistechnologien (selektive Ätztechniken im GaInAsP/AlGaInAs-Materialsystem und Koplanarleitungstechnik mit Luftbrücken), die Optimierung von wellenleiter-integrierten Photodioden bzgl. des Quantenwirkungsgrad-Bandbreite-Produkts, eine HEMT-Entwicklung mit optisch und elektronenstrahl-geschriebenen Gates, eine Breitbandverstärker-Schaltungsentwicklung in MMIC-Technik, die Entwicklung einer höchstfrequenten optoelektronischen Modultechnik sowie den Aufbau einer Detektor/Empfänger-Meßtechnik inkl. Netzwerkanalyse für Frequenzen um 50 GHz und höher. Im folgenden werden die Ergebnisse ausgewählter Themenfelder zur Projektzielerreichung dargestellt.

Ergebnisse zu wellenleiter-integrierten Höchstfrequenz-Photodetektoren

Im Teilvorhaben wurden umfangreiche Erfahrungen zum Design, der Herstellung und Charakterisierung wellenleiter-integrierter Photodioden gewonnen. Dazu gehören Untersuchungen und Prototypenherstellungen zur Auslotung des Bandbreitopotentials dieses Photodiodentyps,

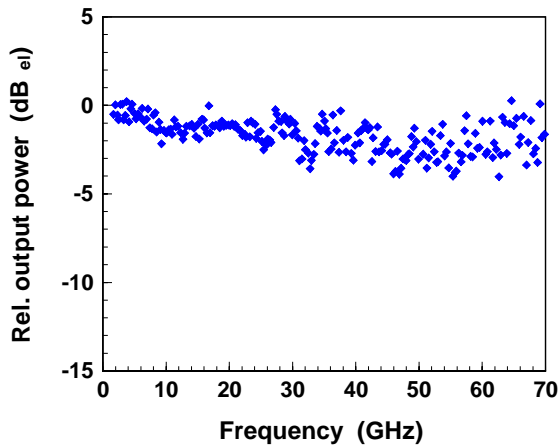


Abb. 1: Bandbreite (elektrisch) einer wellenleiter-integrierten Photodiode mit $5 \times 20 \mu\text{m}^2$ aktiver Fläche bei einer Sperrspannung von $-0,5 \text{ V}$.

wobei für kleine Dioden mit integriertem 50 Ohm Abschlußwiderstand Bandbreiten um 70 GHz erreicht wurden, siehe Abb. 1 /1/. Die Empfindlichkeit betrug, bezogen auf die Faser, $0,3 \text{ A/W}$. Die Empfindlichkeit auf Polarisationsänderungen des Lichtes in der Glasfaser kann durch geeignete Wellenleiterauslegung sehr gering gehalten

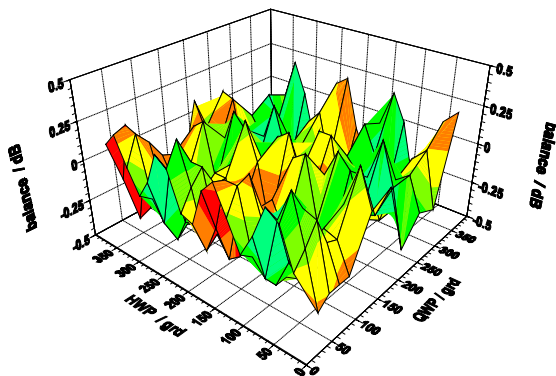


Abb. 2: Restliche Polarisationsabhängigkeit einer wellenleiter-integrierten Photodiode

werden. Hier wurden Werte der restlichen Polarisationsempfindlichkeit von $< |\pm 0,3 \text{ dB}|$ nachgewiesen, siehe Abb. 2.

Die Erzielung eines guten internen Quantenwirkungsgrades, hier verstanden als Wirkungsgrad der Überkopplung vom Chip-Wellenleiter in die Photodiode mit anschließender Trägergeneration, ist ein Hauptvorteil des wellenleiter-integrierten Designs mit evaneszenter Überkopplung. Es wurden interne Quantenwirkungsgrade von 90% erreicht.

Die Abgabe vergleichsweise sehr hoher Photoströme, bei gleichzeitig hoher Bandbreite der Photodiode, ist ein Merkmal des Wellenleiter-Integrationskonzepts der orthogonalen Trennung von Lichtabsorptionsrichtung und Ladungsträgertrennung. Hier ergaben Anregungen mit kurzen optischen Pulsen elektrische Ausgangspulse mit Stromspitzen um 12 mA /1/, siehe auch

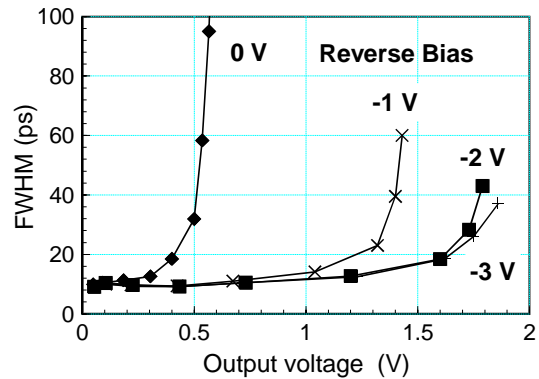


Abb. 3: Ausgangspulsbreite einer wellenleiter-integrierten Photodiode in eine Last von 25 Ohm ; bei Sperrspannungen größer 1 V werden 20 mA ohne nennenswerte Pulsverbreiterung abgegeben.

Abb. 3. Messungen der Linearität der abgegebenen Mikrowellenleistung bei Frequenzen im 60 GHz -Bereich ergaben eine praktisch lineare Zuordnung von Photostrom und optischer Eingangsleistung eines Heterodyn-Beat-Signals bis zu optischen Leistungspegeln von $+10 \text{ dBm}$.

Ein vielversprechendes Verfahren zur Integration von Wellenleitertapern wurde im Rahmen einer

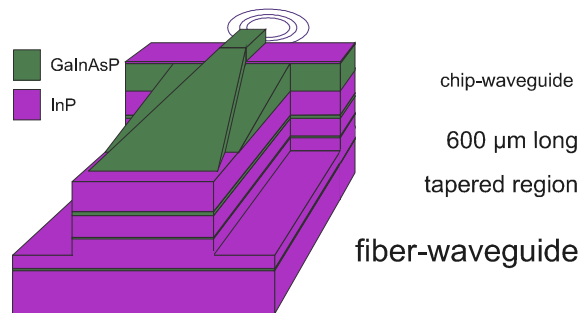


Abb. 4: Struktur des integrierten optischen Tapers, der das elliptische optische Modenbild des Chip-Wellenleiters (oben) an ein kreisförmiges Modenbild der Glasfaser (vorn, unten) anpaßt.

Diplomarbeit untersucht. Ein Basisprozeß eines monolithischen optischen Tapers ist entwickelt worden, der einen Photodiodenwirkungsgrad

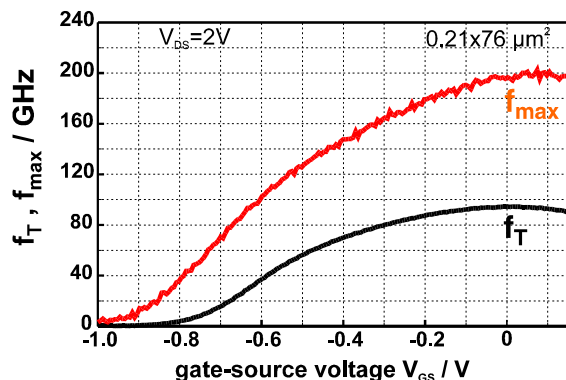


Abb. 5: HF-Verhalten von InP-HEMTs mit elektronenstrahl-geschriebenen Gates der Abmessungen $0,21 \times 76 \mu\text{m}^2$.

> 0,5 A/W verspricht, Abb. 4.

Erzielte Ergebnisse zu InP-HEMTs

Der HEMT-Prozess auf Fe-dotierten optischen Wellenleiterschichten unter Einsatz elektronenstrahl-geschriebener Gates ($f_T/f_{\max} \geq 80/160$ GHz) ist im OEIC-Gesamtintegrationsprozess implementiert und steht für weitere Schaltungsentwürfe zur Verfügung /2/. Abb. 5 zeigt den Verlauf der cut-off Frequenzen f_T und f_{\max} über der Gate-Spannung. Für den Schaltungsentwurf des TWA wurde der optimale Arbeitspunkt auf die Gatevorspannung von 0 V gelegt.

pinTWA-Empfänger-Integration und Schaltungsentwicklung (Unteraufnehmer)

Das Integrationsprinzip zum OEIC basiert auf ganzflächigem MOVPE-Wachstum der semiisolierenden Wellenleiterschichten inkl. des Schichtenpakets der Photodiode, gefolgt von einer Mesaätzung der Photodioden und einem zweiten ganzflächigen Epitaxieprozess auf MBE-Basis des HEMT-Schichtenpakets inkl. einer AlInAs-Pufferschicht (Abb. 6). Die HEMT-

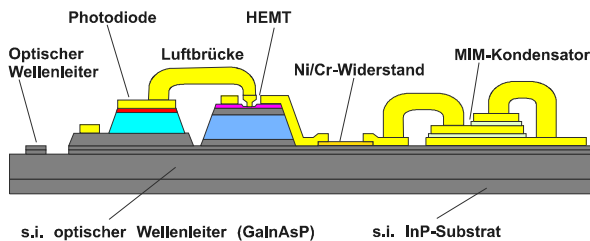


Abb. 6: Photoempfänger-Integration auf einem semiisolierenden Substrat.

Schichtenfolge wird oberhalb der Photodioden entfernt; weitere Prozedurdetails siehe /3/. Ein Empfänger-OEIC für die Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$, der bzgl. des TWA mit kleiner Gruppenlaufzeitschwankung ($< 15\%$ der Bitperiode)

Abb. 7: Photoempfänger-OEIC (pin-TWA), bestehend aus wellenleiter-integrierter Photodiode (unten links) und vierstufigem Wanderwellenverstärker (rechte Chip-Hälfte).

vom Unteraufnehmer entworfen und zusammen mit der Universität Duisburg hergestellt wurde (siehe Abb. 7), zeigte 28 GHz Bandbreite /3/ und erlaubte, am HHI in Modulform verpackt, bei der Alcatel SEL AG den Empfang eines 40 Gbit/s RZ-Signals in einem optischen TDM-Experiment /4/. Unter Einsatz von HEMTs mit

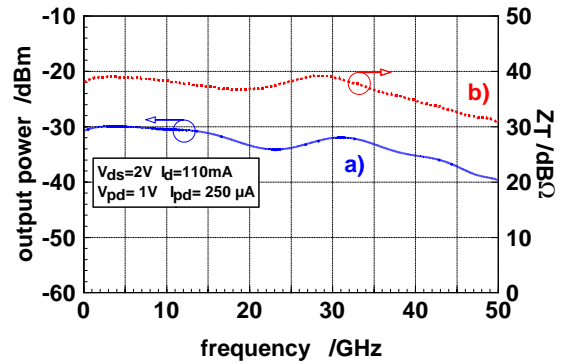


Abb. 8: Optoelektronischer Leistungskonversionsfaktor a) und Transimpedanz b) eines pinTWA-Empfänger-OEIC mit 37 GHz Bandbreite

elektronenstrahl-geschriebenen Gates ($0,25 \mu\text{m}$) wurden Wanderwellenverstärker mit 40 GHz Bandbreite und 7-8 dB Verstärkung und neue Photoempfänger-OEICs mit > 35 GHz Bandbreite hergestellt /5/. Abb. 8 zeigt den Transimpedanzverlauf (39 dB Ω über ca. 30 GHz) und den optoelektronischen Leistungskonversionsfaktor des OEIC über der Frequenz.

Eine Zeitbereichsmessung mit optischen Pulsen

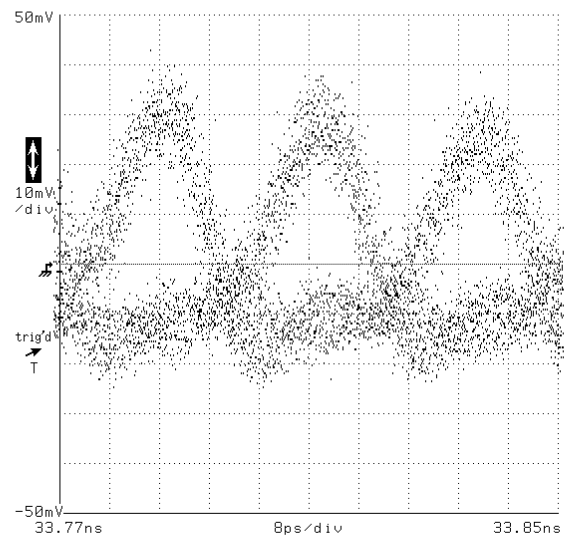


Abb. 9: Optoelektronische Konversion eines 40 Gbit/s RZ-Signalstromes bei $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$; x-Achse: 8 ps/div, y-Achse: 10 mV/div.

der Halbwertsbreite von 3 ps und einer zu 40 Gbit/s gemultiplexten Datenrate ist in Abb. 9 gezeigt. Das Augendiagramm für 40 Gbit/s-RZ-Signale ist gut durchmoduliert. Die Ausgangsamplitude des OEIC (TWA) kann im Großsignalfall bis $0,7 V_{\text{ss}}$ betragen, ohne bezüglich der Modulationstiefe nennenswert zu degradieren.

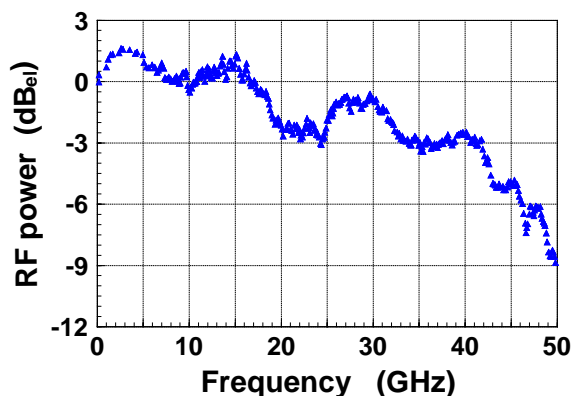
Entwicklung einer Packaging Technik

Für die Übergabe von Photoempfängern an Industriepartner wurde für die OEICs eine Packaging-Technik entwickelt. Diese umfasst die Entwicklung einer Faser-Chip-Kopplung und die

Entwicklung einer Koplanarleitungstechnik vom Chip zum K- bzw. V-Stecker des Moduls. Für die Fasertaper-Chip-Kopplung wurde eine am HHI patentierte Feinstelltechnik angewandt, in der der Fasertaper in einer Kanüle geführt wird, die wiederum mittels in der Modulwandung verschiebbliche Präzisionspaßstifte positioniert wird [3]. Die Paßstifte werden für den Justagezeitraum mit extern angeflanschten Piezotranslatoren im sub-micron-Bereich positioniert, bis ein optimaler Koppelwirkungsgrad erreicht ist, der durch Schraub/klemmfixierung der Paßstifte erhalten wird. Die Verbindungsleitungstechnik zwischen OEIC und K/V-Stecker besteht aus einer Koplanarleitung. Dieser Leitungstyp wurde gewählt, um störende Fehlmodenanregungen an der Chip-Stoßstelle weitgehend auszuschließen, um so die hohen Bandbreiten des OEIC an die Außenwelt zu bringen. Da der in Koplanartechnik ausgeführte OEIC auf InP-Basis auf Durchkontaktierungen verzichtet, könnten derartige Störmoden (ungerade Koplanarmoden und insbesondere Microstrip-Moden) OEIC-seitig nicht wirksam eliminiert werden. Das Aufbaukonzept sieht daher einen modenkonformen Übergang vom OEIC auf eine Koplanar-Zwischenleitung vor, die ihrerseits die Anbindung an den V-Stecker bewirkt. Der dortige Modensprung von radial auf koplanar wird bzgl. einer Störmodenanregung dann mit Durchkontaktierungen auf der Koplanarleitung auf TMM-Basis beherrscht [3].

Ergebnisse zu Photoempfängern

Abb. 10 zeigt die Leistungskonversionscharakteristik eines nun im Modul aufgebauten Photoempfänger-OEICs bei 1,55 μm Wellenlänge.



gemessen mit der optischen Heterodynmeßtechnik. Die OEIC-Bandbreite von 37 GHz ist hier bis ca. 35 GHz nutzbar. Die Photodiode weist inkl. der Faser-Chip-Kopplung einen Konversionsfaktor von typisch 0,35 A/W auf.

Für die Anwendungen in ETDM-Systemen mit NRZ-Signalen zeigt Abb. 11 ein berechnetes Augendiagramm bei 40 Gbit/s, welches aus einer Heterodynmessung der Bandbreite eines OEICs im Modul (Abb. 10) und der Phasener-

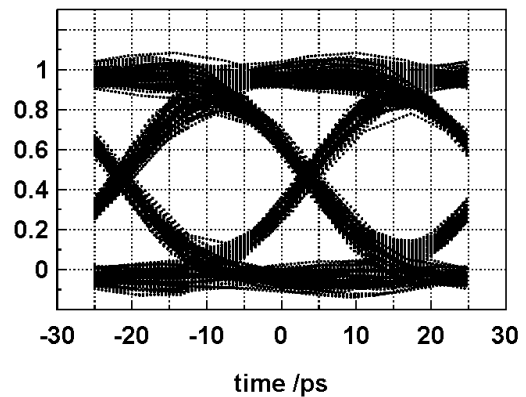


Abb. 11: Augendiagramm eines Photoempfängermoduls für 40 Gbit/s NRZ-Signale, erzeugt aus einer Heterodynmessung der Bandbreite unter Minimalphasigkeit des TWA-Verhaltens, siehe Text; Y-Achse normiert auf 1 V Pegel, Annahme eines linearen Systems.

zeugung gemäß der Minimalphasentheorie mit Konvolutionsmethoden erzeugt wurde. Mit Hilfe von Schaltungssimulationsanalysen wurde gezeigt, daß die hier entworfenen TWAs sich hinreichend genau bzgl. der Gruppenlaufzeit nach der Minimalphasentheorie verhalten. Die Augenöffnung zeigt die gute Anwendbarkeit der Empfänger auch für 40 Gbit/s NRZ-Signale.

Für zukünftige Verbesserungen des 40 Gbit/s-Photoempfängers im Hinblick auf den System-einsatz wurde ein neuer Empfänger-Maskensatz mit Verstärkern in Kaskodenschaltung, mit optionaler Gain-Regelung sowie mit integrierter Bias-Einspeisung und mit kaskadierten Verstärkern als fortgeschrittener Technologiedemonstrator zusammen mit dem Unterauftragnehmer entworfen und am HHI erfolgreich prozessiert. Abb. 12 zeigt als ein Charakterisierungsbeispiel dieser Waferserie die über eine Zusatzspannung regelbare Transimpedanz des Wanderwellenverstärkers. Die breitbandige Verstärkungsregelung wird über einen Shunt-Transistor am Eingang des TWA bewerkstelligt, was sich in Schaltungssimulationen beim Unterauftragneh-

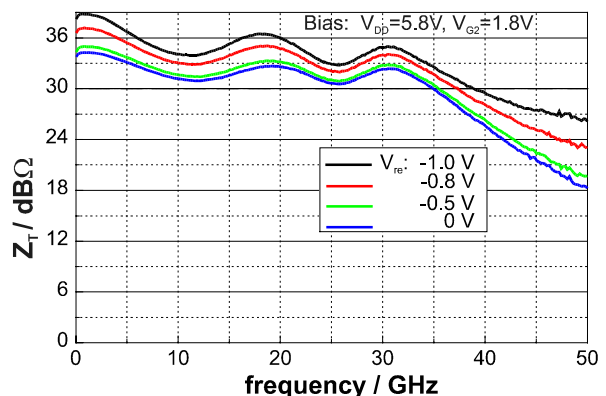


Abb. 12: Gemessene Transimpedanzregelung eines Prototypen-TWA mit Kaskodenschaltungen der vier HEMT-Stufen und integrierter Bias-Einspeisung über verteilte Stromquellen.

mer als günstigste Lösung mit geringster Gruppenlaufzeitsschwankung über den Gesamtverstärkungsbereich herausgestellt hatte.

Im Bereich der Modultechnik wurden neben integrierten Photoempfängern auch eine Reihe von Prototypen schneller Photodioden aufgebaut, wobei die Bandbreite des Photodiodenchips von ca. 70 GHz mit mindestens 45 GHz im aufgebauten Modul nutzbar war [1]. Für die Faser-Chip-Kopplung wurden alternativ zu Feinstelltechniken auch Erfahrungen mit Klebetechniken gewonnen, die in die Weiterentwicklung einer feldversuchstauglichen Modultechnik eingehen werden.

Die Verstärkertechnologie aus dem im Projekt neu entwickelten Empfänger-Integrationskonzept wurde im Rahmen einer Dissertation auf die Entwicklung von 1,55 μm -Schmalband-Höchstfrequenzempfängern angewandt, deren Anwendungspotential im Frequenzbereich 28-65 GHz in der Ausrüstung von neuartigen glasfaser-gespeisten Breitband-Mobilkommunikationsnetzen sehr positiv eingeschätzt wird.

Zusammenarbeit mit Industriepartnern

a) Siemens AG, ÖN, München

An das Teilvorhaben "Entwicklung eines 40 Gbit/s-TDM-Übertragungssystems" (01 BP 430/6) wurden in der Projektlaufzeit zwei Empfängermodule für Systemexperimente in einem 20 Gbit/s ETDM-Testbett abgegeben, siehe Abb. 13.

Der Industriepartner hat damit Datenübertragungsexperimente über 198 km dispersionsverschobene Glaserfaser bei 20 Gbit/s mit NRZ-Kodierung bei einer Bitfehlerrate von 10^{-9} bei einer Empfängerempfindlichkeit von -30,7 dBm (am Eingang des OA) erfolgreich durchführen können, siehe Abb. 14.

Aus dem Projekt wurden dem Industriepartner auch mehrere entspiegelte Photodiodenchips (Bandbreiten um 40 GHz) für hybride Testaufbauten von Photoempfängern mit Siemens-

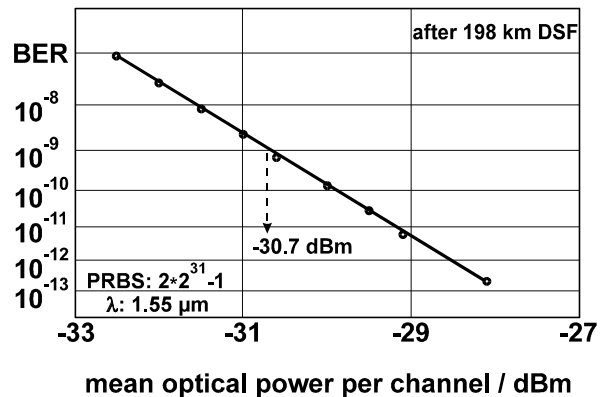


Abb. 14: Bitfehlerrate des pinTWA-Photoempfängers im 20 Gbit/s ETDM-Testsystem bei der Siemens AG, München, bezogen auf den Eingang eines zum Gesamtempfänger zugeordneten optischen Vorverstärkers.

Transimpedanzverstärkern übergeben. Ein weiteres aufgebautes Prototypen-Empfängermodul für 40 Gbit/s-Übertragungsexperimente wurde in der 2. Mai-Hälfte 1998 für Testzwecke übergeben.

b) Alcatel SEL AG, Stuttgart

Zur ergänzenden Charakterisierung des Bandbreitopotentials und des Übertragungsverhaltens der OEIC-Charge für das 20 Gbit/s-Zwischenziel wurde ein fertiggestelltes Empfänger-Modul der Alcatel Telecom Research Division, Stuttgart für ein 40 Gbit/s back-to-back Sende / Empfangsexperiment zur Verfügung gestellt.

Dabei wurde ein bereits brauchbar geöffnetes Augendiagramm eines 40 Gbit/s RZ Datenstroms erhalten (Abb. 15), so daß die Anwendbarkeit der monolithischen InP-Komponente aus

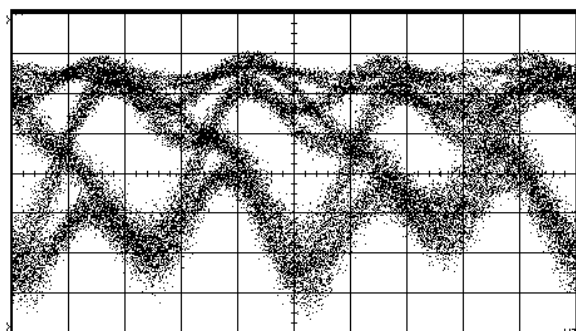


Abb. 15: Gemessenes Augendiagramm eines pinTWA-Photoempfängermoduls bei 40 Gbit/s, empfangen wird ein RZ moduliertes 2^7-1 PRBS Datenmuster, x-Achse: 10 ps/div, y-Achse: 20 mV/div.

wellenleiter-integrierter Photodiode und Wanderwellenverstärker für 40 Gbit/s-Anwendungen erfolgreich demonstriert werden konnte.

Beteiligung an Messen und Ausstellungen

Abb. 13: Photoempfängermodul mit Faserpigtail und K/V-Stecker.

Prototypen der 20/40 Gbit/s-Photoempfänger-Module wurden u.a. auf der OFC'97/98 in den USA, der LOB in Berlin, der CeBit, der Hannover-Messe sowie der ECOC'98 ausgestellt sowie Kontakte zu KMUs geknüpft.

Wertung des Erkenntnisfortschritts und Ausblick

Das im Projekt von Anfang an angewandte Wanderwellenverstärkerkonzept wurde für Breitbandempfänger für Hoch-Bitratenanwendungen bei geringsten linearen Verzerrungen erfolgreich demonstriert. Dieses Schaltungskonzept wird inzwischen auch bei konkurrierenden Labors wie NTT, Japan eingesetzt. Die Ausführungskonzepte der Kernbauelemente: wellenleiter-integrierte Photodioden und HEMTs mit elektronenstrahl-geschriebenen Gates, erlauben ohne Konzeptwechsel durchaus noch höhere Frequenzen, indem Gatelängen und Mesa-Abmessungen moderat verkleinert werden. Auch die Schaltungstechnik des TWA kann im Vergleich zum Transimpedanzverstärker oberhalb der 100 GHz-Grenze eingesetzt werden. Damit ist auch das Ziel, ein Integrationskonzept für mögliche 100 Gbit/s-Anwendungen zu entwickeln, erreicht worden.

Bezugnehmend auf die von der OITDA (Japan) vorgelegte Roadmap zur Entwicklung der optischen Nachrichtentechnik wird ca. im Jahr 2000 die Einführung von 40 Gbit/s-Systemen für das Core-Network am Markt erwartet. In den USA wird für die nahe Zukunft mit ersten Feldversuchen von den führenden Netzbetreibern gerechnet. Die bereits in der Projektlaufzeit vertieften wie auch neu angebahnten Industriekontakte zu den Firmen Siemens AG, Alcatel SEL AG und Lucent Technologies haben zu einer Fortsetzung der begonnenen Breitband-Photoempfänger-Entwicklung im Rahmen des neuen Verbundprojekts KomNet geführt. Für die erwähnten drei Industriepartner werden in einem Projektverbund (Pool-Entwicklung) 40 Gbit/s Photoempfänger-Frontends für die jeweiligen Systemexperimente mit Feldversuchscharakter nach neuen Spezifikationen über Folgeaufzeiten von 3-4 Jahren entwickelt werden. Die entsprechenden drei Anträge wurden nach ausführlichen Abstimmungen der FuE-Pläne im Unterauftrag der Industriepartner vom BMBF genehmigt.

Ausgründungen des HHI

Zwei Mitarbeiter des Projekts beteiligen sich aktiv an der Ausgründung einer Firma (u²t) mit dem Geschäftsziel der Herstellung und des Vertriebs höchstfrequenter Detektoren und Empfängermodule, die in Lizenz des HHI aufgebaut, weiterentwickelt und vermarktet werden sollen.

Veröffentlichungen

Es wurden 40 Veröffentlichungen und Vorträge im Rahmen des Projekts zusammen mit dem Unterauftragnehmer publiziert, fünf wichtige Arbeiten sind:

/1/ G. Unterbörsch, A. Umbach, D. Trommer, G.G. Mekonnen, "**70 GHz long-wavelength photodetector**", Proc. 23rd Europ. Conf. on Optical Communications (ECOC '97), (Edinburgh, U.K.), September 1997, Conf. Publication No. 448 IEE, vol. 2, pp. 25-28.

/2/ G.G. Mekonnen, W. Schlaak, W. Passenberg, A. Umbach, C. Schramm, A. Seeger, and H.-G. Bach, "**Microwave performance of GaInAs/AlInAs-HEMTs grown on optical waveguide layers for high-bit rate optical receivers**", 26th European Microwave Conference (Prag, Tschechische Republik), 9.-12.9.1996, paper P2.17.

/3/ H.-G. Bach, A. Umbach, S. van Waasen*, R.M. Bertenburg* (*Gerhard-Mercator-Universität Duisburg), G. Unterbörsch, "**Ultrafast monolithically integrated InP-based photoreceiver: OEIC-design, fabrication, and system application**", Special Issue of IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics on Integrated Optics (JSTQE), vol. 2, no. 2, June 1996, pp. 418-423 (published in April 1997).

/4/ H.-G. Bach, R.M. Bertenburg*, H. Bülow**, G. Jacumeit, G.G. Mekonnen, A. Umbach, G. Unterbörsch, G. Veith**, S. van Waasen* (*Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Germany, **Alcatel SEL AG, Stuttgart, Germany), "**Ultrafast monolithic InP-based photoreceiver module detecting a 40 Gbit/s optical TDM RZ modulated pulse sequence**", Proc. 23rd Europ. Conf. on Optical Communications (ECOC '97), (Edinburgh, U.K.), September 1997, Conf. Publication 448 IEE, vol. 4, pp. 101-104.

/5/ H.-G. Bach, W. Schlaak, G.G. Mekonnen, R. Steingrüber, A. Seeger, Th. Engel, W. Passenberg, A. Umbach, C. Schramm, and G. Unterbörsch, "**50 Gbit/s InP-Based Photoreceiver OEIC with Gain Flattened Transfer Characteristics**", Proc. 24th Europ. Conf. on Optical Communication (ECOC '98), (Madrid, Spain), Sept. 20-24, 1998, ISBN 84-89900-15-9, vol.1, pp. 55-56.

Erfolgskontrollbericht 1.4. 1994 - 31.3. 1998
Zuwendung aus Einzelplan 30, Kapitel 3004, Titel 683 41

Zuwendungsempfänger: Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin GmbH	Förderkennzeichen: 01 BP 431/7
---	--

Bezeichnung des Teilvorhabens:
Höchstfrequente Empfänger-OEICs auf InP-Basis

Laufzeit des Teilvorhabens:
1.4.1994 - 31.3.1998

Berichtszeitraum:
1.4.1994 - 31.3.1998

Bearbeiter des Projektes:

Dr. H.-G. Bach, G.G. Mekonnen, W. Passenberg, W. Schlaak, Dr. C. Schramm,
A. Seeger, R. Steingrüber, Dr. H. Engel (zeitweise), A. Umbach, G. Unterbörsch

im FuE Unterauftrag:
Universität -GH- Duisburg, FG Halbleitertechnik/Halbleitertechnologie:
S. van Waasen, Dr. R.M. Bertenburg, Prof. F.J. Tegude

Leiter des Teilvorhabens

(Dr.-Ing. H.-G. Bach)

Institutsleitung

(Prof. Dr. C. Baack)

(Dr. W. Grunow)

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse / andere wesentliche Ereignisse:

Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung hochratiger Empfänger-OEICs (40 Gbit/s) für den Wellenlängenbereich um 1,55 μm für optische Nachrichtensysteme mit schneller Zeitmultiplex-Technik auf SDH-Basis. Bei der hier am HHI zusammen mit dem FuE-Unterauftragnehmer Universität -GH-Duisburg, FG HLT, durchgeführten Entwicklung von Empfänger-OEICs werden ein optischer Eingangswellenleiter, eine Photodiode und mehrere HEMTs miteinander monolithisch integriert. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Siemens AG, München (Teilvorhaben: "Entwicklung eines 40 Gbit/s-TDM-Übertragungssystems" (01 BP 430/6) wurden die hier entwickelten Komponenten für 20 und 40 Gbit/s in Modulform in ETDM-Testsystemen getestet.

Wichtige erreichte Ziele im Berichtszeitraumes umfassen die Herstellung von wellenleiter-integrierten Photodioden mit bis zu 70 GHz Bandbreite, die Herstellung von Wanderwellenverstärkern mit 40 GHz Bandbreite und 7-8 dB Verstärkung bei beiden Partnern sowie die erfolgreiche Neuherstellung und Charakterisierung eines pinTWA-Empfänger-OEICs mit 37 GHz Bandbreite für die Wellenlänge 1,55 μm . In einem optischen Zeitmultiplexaufbau wurde am HHI mit dem neuen OEIC eine erfolgreiche optoelektrische Konversion von 40 Gbit/s RZ Signalen mit guter Durchmodulation des Augendiagramms durchgeführt. Ein neuer Maskensatz für Verstärker in Kaskodenschaltung (Entwurf beim Unterauftragnehmer), mit optionaler Gain-Regelung und mit kaskadierten Verstärkern für 40 Gbit/s ist als Technologiedemonstrator am HHI erfolgreich prozessiert worden.

Eine optoelektronische Modultechnik wurde entwickelt, die die Abgabe der Hochbitraten-Empfänger-OEICs in Modulform mit Faserpigtail an Industriepartner (Siemens AG und Alcatel SEL AG) für erfolgreiche Systemtests erlaubte.

2. Vergleich des Standes der Arbeiten mit dem geltenden Arbeitsplan:

Das Teilvorhaben wurde entsprechend dem Projektantrag durchgeführt. Der Finanzierungsplan wurde gemäß Antrag eingehalten.

3. Aussichten auf Zielerreichung:

Die vorgenommenen Ziele sind erreicht worden.

4. Inzwischen bekannt gewordene, relevante FuE-Ergebnisse Dritter:

Von dritter Seite sind keine wesentlichen Ergebnisse bekannt geworden, die für das Teilvorhaben relevant wären.

5. Zieländerungen gegenüber der geltenden Planung:

Es sind keine Änderungen der Zielsetzung notwendig gewesen.

6. Angaben von gemachten Erfindungen, vorgenommenen Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechten:

Es wurden keine Schutzrechte im Berichtszeitraum angemeldet.

Auf der nächsten Seite folgen die Eintragungen für
das Berichtsblatt: Kurzfassung des Schlußberichts

Auf der übernächsten Seite folgen die Eintragungen zum
Document Control Sheet (Englisch).

Schlußbericht

Höchstfrequente Empfänger-OEICs auf InP-Basis

Mekonnen, Gebre Giorgis; Passenberg, Wolfgang; Schlaak, Wolfgang; Schramm, Carsten; Seeger, Angela; Steingrüber, Ralf; Engel, Herbert (zeitweise); Umbach, Andreas; Unterbörsch, Günter; März 1998
September 1998

noch zu 4a.: van Waasen*, Stefan; Bertenburg*, Ralf Michael; Tegude*, Franz-Josef
BMBF-Sachbericht PHOTONIK II

Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin GmbH,
Einsteinerufer 37, 10587 Berlin

01 BP 431/7

im FuE Unterauftrag:
Universität -GH- Duisburg*, FG Halbleitertechnik / Halbleitertechnologie
Kommandantenstr. 60, 47057 Duisburg

6

5

15

In optischen Nachrichtensystemen mit schneller TDM-Technik werden hochratige Photoempfänger für den Wellenlängenbereich 1,3 bis 1,55 μm benötigt. Zu Projektbeginn waren Photoempfänger für 40 Gbit/s-Systeme nur in Hybridbauweise verfügbar. Bei der hier durchgeführten Entwicklung von Empfänger-OEICs auf InP-Basis wurde eine Empfangsdatenrate von ≥ 40 Gbit/s angestrebt und erreicht. Das angewandte Wanderwellenkonzept erlaubt zusammen mit den exzellenten Materialeigenschaften des InP-Systems eine stetige Weiterentwicklung der OEICs auch für noch höhere Bitraten (100 Gbit/s-Bereich). Im Empfänger werden ein optischer Eingangswellenleiter, eine pin-Fotodiode und High-Electron Mobility Transistoren (HEMTs) miteinander monolithisch integriert. Im OEIC ist eine Wanderwellenverstärkerstufe in MMIC-Technologie implementiert. Das Arbeitsprogramm bestand aus einer MBE-Prozeßentwicklung (Überwachen von MOVPE-Wellenleiterschichtenpaketen), der Entwicklung von Basistechnologien (selektive Ätztechniken im GaInAsP/AlGaInAs-Materialsystem und Koplanarleitungstechnik mit Luftbrücken), der Optimierung von wellenleiter-integrierten Fotodioden bzgl. des Quantenwirkungsgrad-Bandbreite-Produkts, einer HEMT-Entwicklung mit optisch und elektronenstrahlgeschriebenen Gates, einer Breitbandverstärker-Schaltungsentwicklung (Unterauftragnehmer), der Entwicklung einer höchstfrequenten optoelektrischen Modultechnik sowie im Ausbau einer Detektor/Empfänger-Meßtechnik für Frequenzen bis 75 GHz. Wellenleiter-integrierte Fotodioden (0.35 A/W) sind mit Grenzfrequenzen bis zu 70 GHz hergestellt worden. Ein Basisprozeß eines monolithischen optischen Tapers ist entwickelt worden, der einen Fotodiodenwirkungsgrad $> 0,5$ A/W ermöglicht. Der HEMT-Prozeß auf Fe-dotierten optischen Wellenleiterschichten unter Einsatz elektronenstrahlgeschriebener Gates ($f_T/f_{\text{max}} \geq 100/200$ GHz) ist in den Gesamtintegrationsprozeß eingefügt worden. Die im Modul aufgebauten Empfänger-OEICs wurden in Systemexperimenten zusammen mit Industriepartnern (Siemens AG, Alcatel SEL) getestet. Ein Empfänger-OEIC, welches gemeinschaftlich mit dem Unterauftragnehmer hergestellt wurde, zeigte 28 GHz Bandbreite und erlaubte, in Modulform verpackt, bei der Alcatel SEL AG den Empfang eines 40 Gbit/s RZ-Signals in einem optischen TDM-Experiment. Verbesserte OEICs mit e-beam HEMTs wiesen 37 GHz Bandbreite auf und waren auch für 40 Gbit/s NRZ-Signale geeignet. Ein neuer Maskensatz für kaskadierte Verstärker für 40 Gbit/s wurde erfolgreich prozessiert. Die entwickelten Photodioden und -Empfänger werden für konkrete Systemanforderungen für mehrere Industriepartner im Verbundprojekt KomNet weiterentwickelt und für 40 Gbit/s TDM-Übertragungs-Feldversuche eingesetzt werden.

Höchstfrequente Photoempfänger, 40 Gbit/s, OEIC, PIC, InP, optische Netze, TDM-Technik, SDH, SONET

Final Report

High-Bit Rate Receiver OEICs Based on InP

Mekonnen, Gebre Giorgis; Passenberg, Wolfgang; Schlaak, Wolfgang; Schramm, Carsten; Seeger, Angela; Steingrüber, Ralf; Engel, Herbert (zeitweise); Umbach, Andreas; Unterbörsch, Günter;	March 1998
	September 1998
acc. to 4a.: van Waasen*, Stefan; Bertenburg*, Ralf Michael; Tegude*, Franz-Josef	BMBF-Sachbericht PHOTONIK II
Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin GmbH, Einsteinufer 37, 10587 Berlin	01 BP 431/7
in R&D Subcontract: Universität -GH- Duisburg*, FG Halbleitertechnik / Halbleitertechnologie Kommandantenstr. 60, 47057 Duisburg	6
	5

	15

In optical networks employing fast TDM techniques high-bit rate photoreceivers are needed, operating in the 1.3 to 1.55 μm wavelength range. At project start such high-speed receivers were only available as hybrids. In this project a detection capability of the InP-based receiver OEICs was aimed and achieved for 40 Gbit/s. Together with the excellent material properties of the InP material system the employed travelling wave design allows a continuous further upgrade of the OEICs towards higher bit rates up to 100 Gbit/s. In the receiver an optical input waveguide, a pin photodiode, and high-electron mobility transistors (HEMTs) are integrated, the latter are forming a travelling wave amplifier (TWA) applying MMIC technology. The work programme comprises an MBE process development (overgrowth of MOVPE-based semiinsulating waveguide layer stacks), the development of basic technologies (selective etching of the GaInAsP/AlGaInAs material system and a coplanar waveguide technique including air-bridges), the optimisation of waveguide-integrated photodiodes with respect to their bandwidth-efficiency product, a HEMT development including gate lithography with optical and electron beam exposure, a circuit design work package (subcontractor), the development of an optoelectronic packaging technology and an extension of the detector / receiver optical heterodyne measurement technique up to 75 GHz. Waveguide-integrated photodiodes (0.35 A/W) have been fabricated with cut-off frequencies as high as 70 GHz. A basic process for a monolithically integrated optical waveguide taper was investigated, which enables future photodiode conversion efficiencies $> 0,5$ A/W. The HEMT process on Fe-doped semiinsulating optical waveguide layers employing electron-beam written gates ($f_T/f_{\text{max}} \geq 100/200$ GHz) was adapted to the pinTWA integration process. Photoreceiver OEICs, which were mounted into handy modules were tested in system experiments together with industry partners (Siemens AG, Alcatel SEL). A receiver OEIC, which was fabricated together with the subcontractor, exhibited 28 GHz bandwidth and, achieved in packaged form, tested at Alcatel SEL AG the detection of 40 Gbit/s RZ signals in an optical TDM experiment. Improved OEICs comprising e-beam HEMTs, achieved 37 GHz bandwidth and are applicable also for 40 Gbit/s NRZ signals. A new mask set for cascaded amplifiers for 40 Gbit/s was successfully processed. The developed photodiodes and receivers will be continuously improved for certain system demands for several industry partners within the upcoming joined project KomNet and will be applied for 40 Gbit/s TDM transmission field experiments.

High-Bit Rate Photoreceiver, 40 Gbit/s, OEIC, PIC, InP, optical networks, TDM-Techniques, SDH, SONET