

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

Band: 76 (1985)

Heft: 15

Artikel: Galliumarsenid-integrierte Optik : Komponenten für die Faserkommunikation

Autor: Buchmann, P. / Kaufmann, H. / Melchior, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904645>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Galliumarsenid-integrierte Optik: Komponenten für die Faserkommunikation

P. Buchmann, H. Kaufmann, H. Melchior, G. Guekos

Elektro-optische Wellenleitermodulatoren mit ihrer grossen Bandbreite sind wichtige Komponenten für optische Kommunikationssysteme mit Datenübertragungsraten im Bereich von Gbit/s. In diesem Artikel werden Herstellung und Eigenschaften von integrierten optischen Bauteilen auf der Basis von GaAs beschrieben. Das anisotrope reaktive Ionenätzen hat sich für die Realisierung der verschiedensten, verlustarmen Wellenleiterstrukturen als ideal erwiesen. Erstmals wurden bei integrierten optischen $\Delta\beta$ -Richtungskopplern und Mach-Zehnder-Interferometern in GaAs Bandbreiten von mehr als 3 GHz gemessen.

Les modulateurs à guide d'ondes à effet électro-optique offrant une grande largeur de bande sont des composants importants pour les systèmes de communication à fibre optique dans le domaine des Gbit/s. Dans cet article la fabrication et les propriétés des composants de l'optique intégrée basés sur l'arseniure de Gallium sont présentées. L'attaque anisotropique réactive a permis de fabriquer une multitude de structures de guides d'ondes à faibles pertes. Des largeurs de bande supérieures à 3 GHz ont pu être atteintes pour la première fois avec des coupleurs directionnels $\Delta\beta$ et avec des interféromètres de Mach-Zehnder en GaAs.

Dieser Aufsatz ist eine ergänzte Fassung des Referates von Prof. Dr. Guekos (vorgelesen von H. Kaufmann) anlässlich der ITG-Informationstagung vom 17. Januar 1985 in Bern.

Adresse der Autoren

P. Buchmann, H. Kaufmann, H. Melchior, G. Guekos, Institut für Elektronik und AFIF, ETH, 8093 Zürich.

1. Einleitung

Die Technik der optischen Kommunikation hat sich weltweit etabliert, und viele Glasfaser-Übertragungssysteme – vorwiegend für die Telefonie – befinden sich im praktischen Einsatz. Die Signalaufbereitung, wie Kodierung, Modulation, Schalten und Demodulation, geschieht dabei fast ausschliesslich elektrisch. Durch Modulation des Stromes von Leuchtdioden oder Laserdioden werden die aufbereiteten Signale in optische Signale umgewandelt, welche anschliessend in die Faser eingekoppelt und übertragen werden.

Leistungsfähige Faserkommunikationssysteme im Bereich von mehreren hundert Megabit bis zu Gigabit pro Sekunde erfordern den Einsatz von stabilen Diodenlasern und von Monomodefasern im infraroten Wellenlängenbereich. Die Technologie der Monomodefasern hat die physikalisch mögliche Minimaldämpfung von 0,18 dB/km bei einer Wellenlänge von 1,55 μm erreicht [1]. Bei Bitraten im Gbit/s-Bereich bewirkt jedoch die restliche Dispersion – vor allem bei 1,55 μm – eine Begrenzung der Systembandbreite. Bei der Übertragung von hohen Bitraten über grössere Faserlängen (etwa 100 km) kommt der Stabilität und der Breite des Laserspektrums entscheidende Bedeutung zu. Die hochfrequente Strommodulation der meisten in der Praxis verwendeten Diodenlaser bewirkt eine Verbreiterung des Spektrums und eine Wellenlängeninstabilität der Lasermoden. Neue Halbleiterlaserstrukturen, die unter dynamischen Verhältnissen einen einzigen stabilen Mode emittieren, werden deshalb intensiv erforscht. Eine andere vielversprechende Lösung scheint neuerdings die *externe* Modulation des Laserlichts darzustellen.

Der externe Modulator erlaubt die Intensitätsmodulation des Laserlichtes im Multi-Gbit/s-Bereich, ohne im Spektrum des mit Gleichstrom betrieb-

benen Lasers Instabilitäten zu verursachen. Die Modulation basiert auf dem elektro-optischen Effekt in Bauelementen, die mittels Wellenleiterstrukturen der integrierten Optik realisiert werden. Mit den an der ETH hergestellten Galliumarsenid(GaAs)-Modulatoren sind Bitraten bis etwa 10 Gbit/s möglich.

Nebst dem Einsatz von GaAs-Modulatoren in faseroptischen Systemen mit direkter Detektion wird die externe Modulation auch für Systeme mit kohärenter Detektion (optisches Heterodyning) ins Auge gefasst. Mit dieser Methode wie auch durch Anwendung eines optischen Wellenlängen-Divisions-Multiplex-Verfahrens wird für zukünftige optische Kommunikationssysteme eine beträchtliche Erhöhung der Übertragungskapazität erwartet.

Wie das Beispiel des externen Modulators zeigt, ermöglichen die Bauteile der integrierten Optik, zur Signalaufbereitung direkt die optische Welle zu beeinflussen. Die Anwendung dieser Bauteile ist keineswegs auf die Faserkommunikation begrenzt; es wird damit gerechnet, dass sie auch in anderen Gebieten der Optoelektronik, wie z.B. in der faseroptischen Sensortechnik und in der Puls- und Messtechnik, interessante Anwendungen finden werden.

2. Wellenleitung und elektro-optischer Effekt in GaAs

Die Anwendung des Wellenleiterprinzips bedeutet, dass die optische Leistung eines kohärenten Strahls auf einer beliebig langen Strecke auf einen sehr kleinen Querschnitt konzentriert bleibt. Dies bringt eine Einsparung in der elektrischen Antriebsleistung von Wellenleitermodulatoren gegenüber beugungsbegrenzten Volumenmodulatoren um einen Faktor 100 bis 1000, was besonders bei hohen Modula-

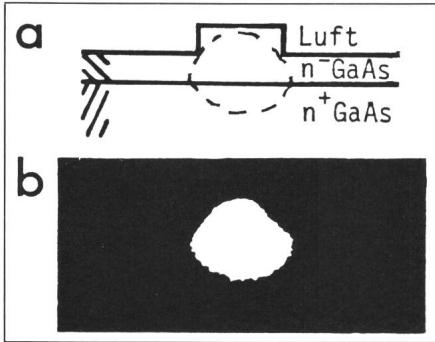


Fig. 1 n⁻/n⁺-GaAs-Rippenwellenleiter
 a Querschnitt der Struktur
 b Intensitätsverteilung des TE₀₀-Modus
 (Aufnahme mit IR-Kamera)

tionsfrequenzen von Bedeutung ist. Eine Bedingung für die Führung des Lichts durch Totalreflexion in einer Wellenleiterschicht ist ein im Vergleich zur Umgebung höherer Brechungsindex dieser Schicht. In GaAs werden Indexänderungen durch Dotierung oder durch Substitution, z.B. mit Aluminium, erzielt. Bei den von uns verwendeten sogenannten n⁻/n⁺-GaAs-Wellenleitern wird eine sehr schwach dotierte Schicht (hoher Brechungsindex) auf einem hochdotierten Substrat (kleiner Brechungsindex) epitaktisch abgeschieden. Durch das Ätzen eines nur wenige Mikrometer breiten Streifens entsteht ein Rippenwellenleiter, der auch seitlich nur einen einzigen Mode führt (Fig. 1).

Grundlage für aktive Bauteile wie optische Modulatoren und Schalter ist der lineare elektro-optische Effekt in GaAs. Die Brechungsindexänderung Δn , die durch ein äusseres elektrisches Feld E senkrecht zur (100)-Kristallebene, d.h. senkrecht zur Chipoberfläche erzeugt wird, hat die Grösse

$$\Delta n = \frac{1}{2} n^3 r_{41} E \quad (1)$$

Der elektro-optische Koeffizient $r_{41} = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$ von GaAs ist nicht besonders gross, zusammen mit dem hohen Brechungsindex ($n \approx 3,3$ im interessanten Wellenlängenbereich) ergibt sich trotzdem eine genügend grosse Indexänderung, um die Propagationseigenschaften des den Kristall durchquerenden Lichts zu beeinflussen. Ein bedeutender Vorteil von GaAs gegenüber anderen elektro-optischen Materialien wie z.B. LiNbO₃ ist die Möglichkeit der monolithischen Integration mit Lichtquellen, Detektoren und elektronischen Komponenten (Verstärker, Multiplexer usw.) auf demselben Chip sowie das Fehlen von Driteffekten (Optical damage).

3. Herstellung von Wellenleitermodulatoren in GaAs

Die Figur 2 zeigt schematisch einen typischen Ablauf des Herstellungsprozesses. Die hochohmige Wellenleiterschicht wird mit Flüssigphasenepitaxie aufgewachsen. Auf der Rückseite des Substrates wird ein ohmscher Kontakt aufgedampft und getempert. Als nächster Schritt werden Schottkykontakte durch Lift-off-Masken aufgedampft. Zur seitlichen Führung des Lichts werden nun Streifen in die Epitaxieschicht geätzt. Damit ein solcher Streifen- oder Rippenwellenleiter nur einen einzigen Lichtmode führt, sind Schichtdicken von etwa 2...5 μm und Streifenbreiten von 4...8 μm notwendig. Dies

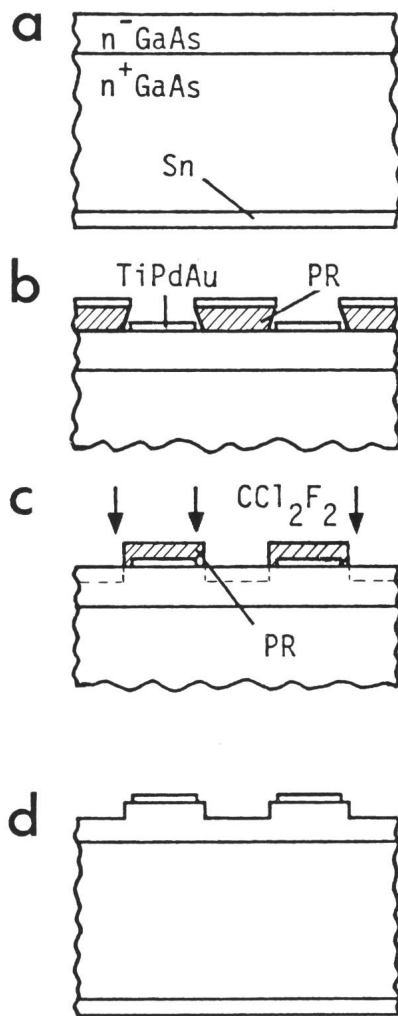


Fig. 2 Prozess zur Herstellung von Wellenleitermodulatoren auf n⁻/n⁺-GaAs

- ▨ PR Photoresist
- a Epitaxie und Ohmscher Substratkontakt
- b Schottkykontakte (Lift-off-Maske)
- c Ionenätzen der Wellenleiterstruktur
- d Fertige Struktur, bereit für Spalten, Entspiegeln, Montage und Bonden

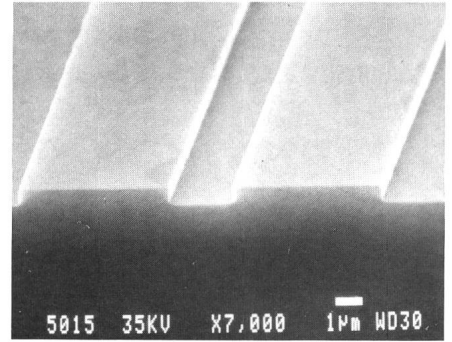


Fig. 3 REM-Aufnahme eines ionengeätzten Richtungskopplers
 Abstand der Wellenleiter 2 μm

stellt sehr hohe Anforderungen an die Maskenqualität und die Ätztechnik. Gewisse Strukturen erfordern eine Auflösung von 0,1 μm , d.h. es kommt nur noch Elektronenstrahl-Lithographie in Frage. Zur Herstellung der Streifen hat sich das reaktive Ionenätzen (RIE) von GaAs in einer CCl₂F₂-Gasentladung am besten bewährt (Fig. 2c). Von grossem Vorteil bei dieser Methode ist das nahezu vertikale Ätzen ohne Unterätzen der Maske. Bei kleinem C1-Partialdruck ist das geätzte Rippenprofil orientierungsunabhängig, was die Herstellung von schrägen und gekurvten Strukturen auf (100)-GaAs erlaubt. Die Kanten sind ausserordentlich glatt, die Streuverluste der Wellenleiter deshalb vernachlässigbar klein.

In der Figur 3 ist eine Elektronenmikroskopaufnahme von ionengeätzten parallelen Wellenleitern, wie sie in einem optischen Richtungskoppler gebraucht werden, wiedergegeben. Mit Hilfe des beschriebenen Prozesses können noch Wellenleiter mit einem Abstand von 0,4 μm hergestellt werden.

4. Eigenschaften passiver und aktiver Bauteile

Zur Bestimmung der Eigenschaften von Wellenleiterbauteilen wird ein Laserstrahl über gespaltene Stirnflächen ein- und ausgekoppelt. Eine derartige Spaltfläche (Kristallebene) ist auch in Figur 3 zu sehen.

Eine Reihe passiver Komponenten wie Y-Koppler, Richtungskoppler [2], Doppelkurven, totalreflektierende Eckspiegel [3] usw. wurden auf kleine Verluste optimiert. Mit dem oben beschriebenen Prozess können Rippenwellenleiter mit einem Propagationsverlust im Bereich von 2 dB/cm hergestellt werden. Diese für GaAs sehr klei-

nen Verluste sind praktisch nur noch auf die Absorption im hochdotierten Substrat zurückzuführen. Mit der Technik des Ionenätzens können auch verlustarme Wellenleiterkurven sowie Ecken und tiefgeätzte totalreflektierende Spiegel [3] realisiert werden.

Die Winkel bei abrupten Richtungsänderungen eines Streifenwellenleiters sowie die Verzweigungswinkel bei Y-Kopplern müssen auf sehr kleine Werte ($< 0,5^\circ$) beschränkt werden, um die wegen der schwachen seitlichen Führung des Modes zusätzlich auftretenden Strahlungsverluste akzeptabel klein zu halten. Beim Y-Koppler muss zudem beim Verzweigungspunkt der beiden Wellenleiter eine möglichst scharfe Spitze realisiert werden (schmales Gap), damit keine Reflexion der Lichtwelle zurück zum Laser auftritt. Mit der Ionenätztechnik und geeigneten Masken konnten Gap-Breiten von 0,4 bis 0,6 μm erreicht und die Reflexionsverluste unmessbar klein gemacht werden.

Obwohl ein passives Element, kann der Monomode-Y-Koppler als optischer Phasendetektor eingesetzt werden: zwei in den beiden Armen einfallende Moden interferieren je nach Phasenlage. Die Intensität im Ausgangskanal ist eine Funktion dieser Phasendifferenz Φ

$$I/I_0 = \cos^2 \Phi / 2 \quad (2)$$

Das einfachste aktive Bauteil ist der optische Phasenmodulator. Wird zwischen Schottkykontakt und Substrat eine Sperrspannung angelegt (Fig. 2d), so konzentriert sich das elektrische Feld auf die hochohmige Epitaxialschicht. Da auch die Lichtintensitätsverteilung hier ihr Maximum hat, kann der Mode über die elektro-optisch induzierte Brechungsindexänderung nahezu optimal beeinflusst wer-

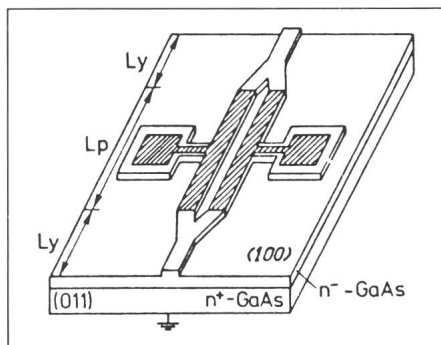


Fig. 4 Mach-Zehnder-Interferometer auf n^+/n^- -GaAs
 $L_y = 1,8 \text{ mm}$, $L_p = 3,3 \text{ mm}$

den. Elektronische und optische Eigenschaften des Halbleiters lassen sich also in dieser Struktur ideal kombinieren. Die durch die kleine Elektrodenfläche bedingte, sehr niedrige Kapazität des Schottkykontaktes ermöglicht die Realisierung von elektro-optischen Bauteilen mit Bandbreiten im Gigahertzbereich.

Bei einem grossen Dotierungsgefälle am Übergang n^-/n^+ ist die Phasenmodulation nahezu linear von der angelegten Spannung abhängig, sobald die Epitaxialschicht an Ladungsträgern verarmt ist. Am Institut für Elektronik der ETHZ wurden Schichten mit einer Dotierung kleiner als $5 \cdot 10^{14}/\text{cm}^3$ hergestellt, die weniger als 3 V zur vollständigen Verarmung der Epitaxialschicht benötigen. Gemessen werden kann die Phasenschiebung z.B. mit einem externen Interferometer.

Der Aufbau eines integrierten elektro-optischen Mach-Zehnder-Interferometers ist in Figur 4 wiedergegeben. Es besteht aus einer Kombination von Y-Kopplern als Strahlteiler bzw. Phasendetektor sowie zwei parallelen Phasenmodulatoren. Bei der Optimierung dieses Bauteils muss eine grosse Anzahl Effekte berücksichtigt werden. Antireflexschichten an Ein- und Auskopplungsfacetten verhindern Fluktuationen der Leistung und des Spektrums des Lasers infolge Rückkopplung von Licht. Um den Modulator in einem optischen Übertragungssystem sinnvoll einsetzen zu können, müssen Propagations-, Verzweigungs-, Eck- und Einkopplungsverluste minimiert werden. Der Abstand zwischen den Phasenmodulatoren muss genügend gross sein, damit keine Modenkopplung auftritt. Eine Asymmetrie der Y-Koppler bzw. verschieden grosse Verluste in den beiden Phasenmodulatoren beeinträchtigen den maximalen Modulationsgrad. Unterschiedliche Propagationskonstanten in den Zweigen müssen mit einer überlagerten DC-Spannung an einem Phasenmodulator kompensiert werden.

Die im Institut für Elektronik hergestellten Mach-Zehnder-Interferometer haben zum Teil Verluste von weniger als 5 dB. Dies ist nur möglich dank der Ionenätztechnik, mit welcher nicht nur gute Wellenleiter, sondern auch praktisch verlustfreie Y-Verzweigungen hergestellt werden können. Für eine 100%-Intensitätsmodulation sind, je nach Dicke der Epitaxialschicht, Antriebsspannungen von etwa 10 bis 25 V nötig. In Figur 5 ist die Ausgangsleistung eines Interferometers als Funk-

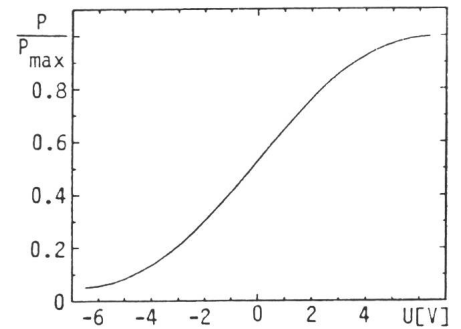


Fig. 5 Push-pull-Betrieb eines Interferometers
 P/P_{max} relative optische Ausgangsleistung
 U AC-Spannung

tion der Modulationsspannung im sogenannten Push-pull-Betrieb (gegenphasige Ansteuerung beider Modulatoren) wiedergegeben. Eine Spannung von 13 V genügt hier für einen Modulationsgrad von 12,7 dB (94,6%). Modulationsgrade von mehr als 14 dB wurden bei Kopplung an eine Monomodefaser gemessen. Die maximale Bandbreite dieser Interferometer liegt im Bereich von 4 bis 6 GHz [4].

Ein aktives Bauteil, der neben der Anwendung als Modulator auch als (räumlicher) Schalter für kohärentes Licht eingesetzt werden kann, ist der optische Richtungskoppler [2]. Dieser besteht aus zwei gekoppelten Streifenwellenleitern mit sehr kleinem Abstand (Fig. 3). Bei passiven Richtungskopplern kann der Austausch optischer Leistung zwischen den Kanälen als Interferenzphänomen des symmetrischen und asymmetrischen Modes (ähnlich wie beim Mikrowellenrichtungskoppler) verstanden werden. Jeweils nach einer bestimmten Strecke, der sog. Kopplungslänge, hat ein vollständiger Energieaustausch zwischen den beiden parallelen Wellenleitern stattgefunden. Die elektro-optische Beeinflussung der Modenkopplung ermöglicht das Schalten von Licht von einem Kanal zum andern. Da die Länge des einfachen Richtungskopplers mit der Kopplungslänge der beiden Moden übereinstimmen muss, ist die Realisierung von Bauteilen mit hohem Kanalabstand sehr schwierig. Eine wesentliche Verbesserung stellt der $\Delta\beta$ -Richtungskoppler mit zusätzlichen Elektroden dar, bei welchem das Verhältnis Bauteillänge zu Kopplungslänge in einem grossen Bereich (1...3) variieren darf.

Es wurden $\Delta\beta$ -Koppler mit einem Bauteilverlust von nur 4,3 dB realisiert. Eine On-off-Ratio von 24 dB wurde bei einer Schaltspannung von 31 V bei $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ gemessen. Der

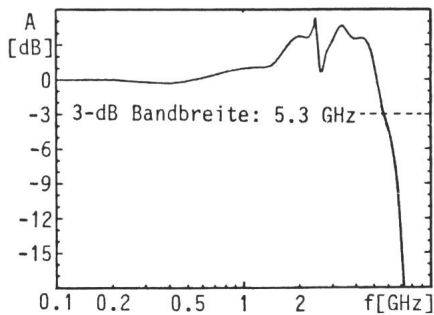


Fig. 6 Kleinsignalfrequenzgang des Richtungskopplers mit alternierendem $\Delta\beta$

A Amplitude
f Frequenz

Kleinsignalfrequenzgang wurde mit einer indirekten Methode [5] bestimmt. In guter Übereinstimmung mit Modellrechnungen findet man eine 3-dB-Grenzfrequenz von 5,3 GHz (Fig. 6). Die Überhöhung im Bereich von 1 bis 4 GHz ist auf die Induktivität der Bonddrähte zurückzuführen, während der markante Dip bei 2,5 GHz von einem Resonanzeffekt auf dem Montagehalter herrührt. Die direkte Messung des Frequenzganges bis 1 GHz mit einem schnellen Photodetektor ergab gute Übereinstimmung mit der indirekten Methode. Die Bauteile lassen sich also als Schalter oder Modulatoren bis zu einer Datenrate von 10 Gbit/s einsetzen.

5. Anwendungen

Die enorme Bandbreite der elektrooptischen Wellenleitermodulatoren macht sie besonders interessant für Anwendungen in Lichtwellenleitersystemen mit sehr hohen Datenübertragungsraten. Als externe Modulatoren zusammen mit frequenzstabilen Laserdioden vermeiden sie die bei direkter Modulation in den meisten Laserdioden auftretende Verbreiterung des optischen Spektrums bei hohen Datenraten (>1 Gbit/s). Schnelle Schalter können als Zeitmultiplexer/-demultiplexer und in optischen Schaltnetzwerken eingesetzt werden. Passive Richtungskoppler finden Anwendung als Wellenlängen(de)multiplexer und als Strahlteiler. In kohärenten Systemen mit Phasenmodulation können Y-Koppler als Phasendetektoren verwendet werden.

Am Institut für Elektronik, Fachgruppe Optoelektronik, der ETHZ wurde erstmals ein GaAs-Wellenleiter-

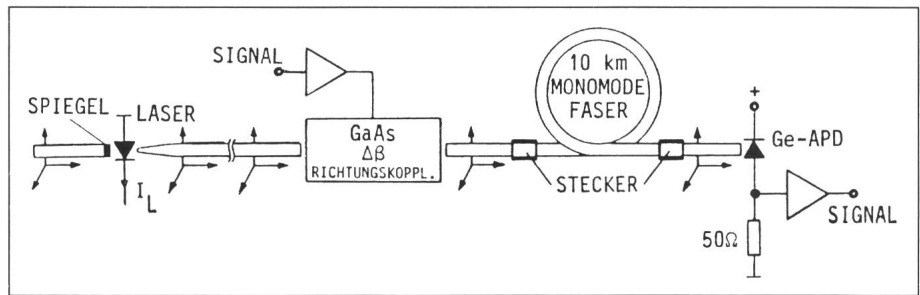


Fig. 7 Faseroptisches Übertragungsexperiment mit externem GaAs-Modulator bei 1 GHz

modulator zur Signalübertragung in einem Breitband-Monomodfasersystem eingesetzt. Mit Mach-Zehnder-Interferometern wurden Daten mit einer Rate von 560 Mbit/s bei Wellenlängen von 1,3 und 1,53 μm über Fasern bis zu 30 km ohne Dispersionseffekte übertragen.

In einem anderen Experiment wurde ein 1-GHz-Sinussignal (entspricht 2 Gbit/s) mit Hilfe eines $\Delta\beta$ -Richtungskopplers als externer Modulator über eine 10-km-Faser übertragen (Fig. 7). Die Möglichkeiten von GaAs-Modulatoren für die Multi-Gbit/s-Übertragung wurden damit demonstriert.

Integrierte optische Schaltkreise könnten in einigen Jahren in optischen Heterodyne-Systemen die Aufbereitung des optischen Signals übernehmen. So kann z.B. ein optischer Frequenzschieber zur Abstimmung der Lokaloszillatorfrequenz aus Interferometern aufgebaut werden. Die Modulation wird ermöglicht durch die Nichtlinearität von (2). Für die Tele- und besonders die Computerkommunikation werden extrem schnelle Schaltmatrizen benötigt, die prinzipiell auf einem GaAs-Chip realisiert werden könnten. Wanderwellenmodulatoren werden zur Erzeugung von kurzen Pulsen und als optische Sampler Verwendung finden. Andere mögliche Anwendungen zeigen sich in faseroptischen Sensoren (z.B. Gyroskop), in ultraschnellen A/D-Wandlern und in bistabilen optischen Elementen.

Voraussetzung für die Verwirklichung dieses Potentials in III-V-Halbleitern ist die Lösung einer Reihe von technologischen Problemen. Neue Epitaxiemethoden (Molekularstrahl- und Gasphasenepitaxie) sollten die

monolithische Integration mehrerer optischer und elektronischer Komponenten auf einem grossflächigen Epitaxiechip in nächster Zukunft ermöglichen. Viel Arbeit muss auch noch in die Entwicklung einer geeigneten Montagetechnik für die Ankopplung von Monomodfasern an Wellenleiter und deren Justierung investiert werden.

Das Hauptanwendungsgebiet dieser Wellenleiterbauteile dürfte vorerst der Einsatz von Einzelkomponenten als Modulatoren in Langstreckenverbindungen mit grossen Datenübertragungsraten (Verbindungen zwischen Zentralen) sein. Daneben ist die Anwendung solcher Komponenten in kleinen Stückzahlen für spezielle Messgeräte wahrscheinlich. Eine breite Verwendung integrierter optischer Komponenten, z.B. als Sender-Empfänger bei Teilnehmeranschlüssen an lokale Netzwerke in Monomodetechnik, ist erst zu erwarten, wenn die monolithische Integration von Lasern, Modulatoren, Detektoren und Transistoren beherrscht wird.

Literatur

- [1] K. Kitayama a. o.: Ultralow-loss 220 km-long single-mode-fibre cable link in 1.5 μm wavelength region. *Electronics Letters* 20(1984)19, p. 774...775.
- [2] P. Buchmann a. o.: Reactive ion etched GaAs optical waveguide modulators with low loss and high speed. *Electronics Letters* 20(1984)7, p. 295...297.
- [3] P. Buchmann a. o.: Totally reflecting mirrors: fabrication and application in GaAs rib waveguide devices. *Integrated Optics* (Springer series in optical sciences) 48(1985), p. 135...139.
- [4] H. Buchmann a. o.: Broadband Y-branch electro-optic GaAs waveguide interferometer for 1.3 μm . *Applied Physics Letters* 46(1985)5, p. 462...464.
- [5] S. Uehara: Calibration of optical modulator frequency response with application to signal level control. *Applied Optics* 17(1978)1, p. 68...71.