Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

Band: 70 (1992)

Heft: 9

Artikel: Integrierte Optik. 2.Teil = Optique intégrée. 2e partie

Autor: Affolter, Niklaus C. / Deutsch, Christian

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-874004

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.01.2026

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

Integrierte Optik (2. Teil)*
Optique intégrée (2e partie)*

Niklaus C. AFFOLTER und Christian DEUTSCH, Bern

33 Passive und steuerbare integriert-optische Halbleiterkomponenten

331 Wellenleiter

Das Grundelement jeder integriert-optischen Komponente ist der zweidimensionale optische Wellenleiter. Sein Aufbau erfordert neben der Führungseigenschaft senkrecht zur Wellenleiterschicht auch ein geeignetes *laterales* Brechungsindexprofil. Diesem Zweck dienen die verschiedensten Typen, wie eindiffundierte, protonenimplantierte, vergrabene oder geätzte Wellenleiter. Bei III-V-Halbleitern werden am häufigsten die in *Figur 8* dargestellten Typen angewendet. Beim *Streifenleiter* wird direkt die Wellenleiterschicht strukturiert. Der Vorteil liegt in der einfachen Herstellungstechnologie. Sie erfordert im Prinzip nur eine Epitaxieschicht und einen selektiven Ätzprozess. Wegen des hohen Brechungsindexunterschiedes zu Luft entsteht aber ein vertikal stark asymmetrisches Modenprofil. Zudem müssen erhöhte Verluste durch Kanteneffekte in Kauf genommen werden. Der *streifengeladene Wellenleiter* besteht aus einer unstrukturierten Schicht und einem darüberliegenden Streifen aus einem geeigneten Material mit niedrigerem Brechungsindex, analog der Mantelschicht (Cladding) bei einer Glasfaser. So lassen sich sowohl die Modensymmetrie verbessern als auch die Kanteneffekte reduzieren. Beim *Rippenleiter* schliesslich wird in die oberste Schicht, die entweder die Wellenleiterschicht selber oder eine Deckschicht mit niedrigerem Brechungsindex sein kann, eine Stufe geätzt, wodurch sich die Oberflächenstreuverluste noch weiter vermindern lassen.

Diese drei Wellenleitertypen können grundsätzlich als Homostrukturen oder als Heterostrukturen aufgebaut werden. *Homostrukturen* bestehen aus einer undotierten (n^--)Schicht auf einem hochdotierten (n^+-)Substrat der gleichen Zusammensetzung. Der nötige Brechungsindexunterschied kommt bei einem solchen *n^-/n^+-Wellenleiter* also nur durch die unterschiedliche Dichte der freien Ladungsträger zustande. Beispielsweise beträgt die Brechungsindexreduktion für GaAs bei einer Wellenlänge von 1,3 µm etwa $-0{,}0027$ (0,08 %) je 10^{18} cm^{-3} freie Ladungsträger. Der Hauptnachteil dieser einfachen Struktur besteht in der verhältnismässig hohen Absorp-

* 1.Teil in den «Technischen Mitteilungen PTT» Nr. 7/1992 erschienen

33 Composants semi-conducteurs d'optique intégrée passifs et actifs

331 Guides d'ondes

Le guide d'ondes optique à deux dimensions est l'élément de base de tout composant optique intégré. De par sa construction, il doit non seulement guider les ondes perpendiculairement par rapport à la couche du guide optique, mais aussi posséder un profil d'indice de réfraction *latéral* approprié. Les types les plus divers sont utilisés à cet effet notamment ceux à couche diffusée, cachée ou obtenue par attaque de surface ou encore par implantation de protons. Dans le cas des semiconducteurs III-V, on utilise le plus souvent les types représentés à la *figure 8.* La couche du *guide d'ondes latéral* est directement structurée. L'avantage de cette méthode réside dans la technologie de fabrication simplifiée. Elle n'exige en principe qu'une couche produite par épitaxie et un processus sélectif d'attaque de surface. En raison de la grande différence de l'indice de réfraction par rapport à l'air, le profil modal vertical résultant est fortement asymétrique. En outre, il faut prendre en compte des pertes élevées dues à des effets d'arête. Le *guide d'ondes chargé diélectriquement* consiste en une couche non structurée recouverte d'une bande en matériau approprié à faible indice de réfraction, qui ressemble à la gaine (cladding) d'une fibre optique. On peut ainsi améliorer non seulement la symétrie modale mais aussi réduire les effets d'arête. Dans les *guides d'ondes arête,* on pratique une encoche longitudinale dans la couche supérieure par attaque de surface, qui peut être soit la couche du guide d'ondes considéré ou une couche de recouvrement à faible indice de réfraction, d'où une réduction encore plus poussée des pertes de surface par diffusion.

Par principe, ces trois types de guides d'ondes peuvent être constitués en tant qu'homostructures ou qu'hétérostructures. Les *homostructures* consistent en une couche (n^-) non dopée et en un substrat (n^+) hautement dopé de la même composition. La différence d'indice de réfraction nécessaire n'est donc due, dans un tel guide d'ondes (n^-/n^+) qu'à la densité différente des porteurs de charges libres. La réduction de l'indice de réfraction

Première partie parue dans le «Bulletin technique PTT» N° 7/1992

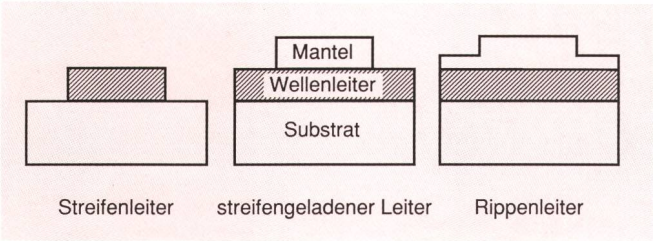

Fig. 8 Schematischer Querschnitt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung durch die drei am häufigsten verwendeten Wellenleitertypen in epitaktischen III-V-Schichtfolgen – Coupe schématique perpendicule à la direction de propagation des trois types de guides optiques les plus courants dans les successions épitaxiales de couches III-V

tion durch die freien Ladungsträger wegen dem im Substrat verlaufenden Teil der Strahlungsmodi («evaneszentes» Feld): Typische Dämpfungswerte betragen etwa 2...5 dB/cm [17]. Diesem Problem kann durch eine *Heterostruktur* begegnet werden, bei der eine undotierte, gitterangepasste Schicht mit niedrigerem Brechungsindex den Wellenleiter vom Substrat trennt. Bei der Galliumarsenid-Technologie wird dazu meist Aluminium-Galliumarsenid verwendet, während der Wellenleiter selbst aus reinem Galliumarsenid besteht. So werden Dämpfungswerte von etwa 0,5 dB/cm erreicht. Solche Werte können bei typischen Bauteilabmessungen von 1 cm als gut bezeichnet werden. Bei der Indiumphosphid-Technologie dagegen muss der Wellenleiter aus vier Elemente enthaltendem (quaternärem) Material bestehen, da Indiumphosphid selbst einen tieferen Brechungsindex aufweist. Aufgrund noch vorhandener Materialprobleme liegen die Dämpfungswerte dieser Strukturen deutlich über 1 dB/cm. Hier muss die Materialtechnologie noch Fortschritte machen. Bessere Ergebnisse (0,8 dB/cm) wurden mit Aufbauten erzielt, die anstelle von quaternärem Material eine Schichtstruktur aus Indium-Galliumarsenid und Indiumphosphid verwenden [17].

Im weiteren treten Streuverluste an Grenzschicht- und Oberflächeninhomogenitäten auf. Sie werden von der Schichtqualität, dem Wellenleiteraufbau und der Herstellungstechnologie beeinflusst. Für geätzte Wellenleiter sind sie vor allem durch die Oberflächenrauhigkeit bestimmt. Falls die Seitenwandrauhigkeit der Rippe überwiegt, was besonders beim Trockenätzen der Fall ist, steigen die *Streuverluste ungefähr proportional zur Rippenhöhe* an, sinken mit wachsender Rippenbreite und sind von der Struktur (Homo- oder Heterostruktur, mit oder ohne Deckschicht) fast unabhängig [18]. Eine möglichst geringe Rippenhöhe wäre also vorteilhaft, verschlechtert aber natürlich die laterale Führungseigenschaft.

Um die Integrationsdichte integriert-optischer Schaltkreise zu erhöhen, ist man auf Strahlumlenkungen angewiesen, was durch kurvenförmige Wellenleiter erreicht werden kann. Dank der Kristallrichtungsunabhängigkeit von Trockenätzprozessen bietet dies herstellungstechnologisch keine Probleme. Dagegen führen Kurvenstücke zu zusätzlichen Verlusten, die möglichst klein zu halten sind. Sie rühren daher, dass der Strahlungsmo-

comporte, par exemple, pour le GaAs à une longueur d'ondes de 1,3 µm environ –0,0027 (0,08 %) pour 10^{18} cm^{-3} porteurs de charges libres. L'inconvénient majeur de cette structure simple réside dans l'absorption relativement élevée par les porteurs de charges libres due à la composante de modes de rayonnement se propageant dans le substrat (champ «évanescent»): les valeurs d'affaiblissement typiques sont d'environ 2 à 5 dB/cm [17]. Il est possible de parer à cette inconvénient par l'emploi d'une *héterostructure,* dans laquelle une couche non dopée, adaptée au réseau cristallin et, possédant un faible indice de réfraction, sépare le guide d'ondes du substrat. Dans la technologie fondée sur l'arséniure de gallium, on utilise généralement à cet effet de l'arséniure de gallium et d'aluminium, cependant que le guide d'ondes lui-même est en arséniure de gallium pur. Les valeurs d'affaiblissement atteintes s'élèvent à environ 0,5 dB/cm. Pour une dimension typique de 1 cm des composants, de telles valeurs sont bonnes. En revanche, dans la technologie fondée sur le phosphure d'indium, le guide d'ondes doit être constitué d'un matériau comprenant quatre éléments (matériau quaternaire), vu que le phosphure d'indium lui-même possède un indice de réfraction peu élevé. En raison des problèmes inhérents au matériau, les valeurs d'affaiblissement de ces structures sont nettement supérieures à 1 dB/cm. Dans ce cas, la technologie des matériaux doit encore progresser. Des résultats supérieurs (0,8 dB/cm) ont été atteints grâce à des structures épitaxiales à base d'arséniure de gallium et d'indium et de phosphure d'indium à la place d'un matériau quaternaire [17].

Par ailleurs, on observe des pertes par diffusion dues aux inhomogénéités de la couche limite et des surfaces. Ces pertes sont influencées par la qualité des couches, la structure du guide d'ondes et la technologie de fabrication. Pour les guides d'ondes traités par attaque de surface, les pertes sont avant tout dues à la rugosité surfacique. Si la rugosité latérale de l'arête excerce une influence prépondérante, ce qui est notamment le cas lors de l'attaque de surface à sec, les *pertes par diffusion s'accroissent d'une manière à peu près proportionnelle à la hauteur de l'arête,* diminuent en fonction de la largeur de l'arête et sont pratiquement indépendantes de la structure (homostructure ou hétérostructure, avec ou sans couche de surface) [18]. Une hauteur d'arête aussi faible que possible sera donc avantageuse, mais elle détériore évidemment les caractéristiques de guidage latéral.

Afin d'augmenter la densité d'intégration des circuits optiques intégrés, on est obligé de recourir à la déviation des rayons lumineux, qui peut être réalisée en utilisant des guides d'ondes curvilignes. Vu que les procédés d'attaque de surface à sec sont indépendants de l'orientation des cristaux, la technologie de fabrication ne soulève aucun problème. Les éléments incurvés, en revanche, conduisent à des pertes supplémentaires qui doivent être maintenues aussi faibles que possible. Elles proviennent du fait que le mode de rayonnement lors de la propagation est repoussé vers le bord extérieur de l'élément incurvé. On pare à cet inconvénient en prévoyant un décalage latéral, d'une part, pour améliorer le chevauchement modal entre les éléments rectilignes et les éléments curvilignes du guide d'ondes et, d'autre

dus bei der Ausbreitung an den äusseren Kurvenrand gedrängt wird. Dem kann begegnet werden, indem einerseits zwecks besserer Modenüberlappung zwischen geraden und kurvenförmigen Wellenleiterabschnitten ein seitlicher Versatz eingebaut und anderseits – zur Verringerung der seitlichen Abstrahlung auf der Kurvenaussenseite – eine Rinne geätzt wird, was dort eine stärkere seitliche Führung ergibt. Mit dieser Methode können die Umlenkverluste durch Abstrahlung vernachlässigbar klein gehalten werden [19]. Bei Kurvenradien von 200 µm wurden Gesamtverluste von etwa 0,4 dB/90° erreicht [20].

332 Integrierte Spiegel

Eine Alternative zu Kurvenstücken bilden integrierte Umlenkspiegel. Es genügt, im Kreuzungspunkt zweier Wellenleiter durch Wegätzen der Wellenleiterschicht eine senkrechte Begrenzungsfläche zu bilden, da der Totalreflexionswinkel für III-V-Materialien gegen Luft im interessierenden Wellenlängenbereich unter 20° liegt. Eine Strahlumlenkung um 90° mit einer unter 45° stehenden Spiegelfläche ist deshalb theoretisch *verlustfrei.* Die Herstellung solcher Spiegel erfordert allerdings besondere Techniken, um senkrechte Flächen mit geringer Rauhigkeit mehrere Mikrometer tief in die III-V-Schichtstruktur zu ätzen. Um die Umlenkverluste unter 1 dB halten zu können, muss die Positioniergenauigkeit des Spiegels besser sein als 10 % der Wellenleiterbreite (d. h. kleiner als 0,5 µm), seine Verdrehung und die Verkippung (Abweichung von der Senkrechten) müssen unter 1° liegen, und die Oberflächenrauhigkeit sollte 10 nm nicht wesentlich übersteigen [21].

Diese Bedingungen können nur mit fotolithographischen Methoden und im Trockenätzverfahren eingehalten werden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes in Zusammenarbeit mit der *Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich* im europäischen Projekt Oscar über optische Schalter werden bei den Schweizerischen PTT-Betrieben Trockenätzverfahren zur Herstellung von Rippenwellenleitern in III-V-Halbleiterschichten und von Spiegeln in Indiumphosphid-Materialien untersucht und entwickelt. Für das Ätzen von III-V-Halbleitern eignen sich chlorierte Gase (Cl_2, CCl_4, $SiCl_4$) zur Plasmaerzeugung (siehe Abschnitt 312). Dabei müssen wegen dem niedrigen Dampfdruck der Reaktionsprodukte des Indiums ($InCl_x$) die aus Indiumphosphid bestehenden Substrate während des Ätzprozesses auf einer Temperatur von mindestens 200 °C gehalten werden [22]. *Figur 9* zeigt ein Beispiel einer solchen Ätzung. Als Ätzmaske diente ein mit Ultraviolettstrahlen behandelter Fotolack, der bis 220 °C formstabil bleibt. Er ist als wellenförmig strukturierte Deckschicht erkennbar.

333 Schalter, Modulatoren, Konverter und Filter

Wie erwähnt beruht die Funktion der meisten steuerbaren Bauelemente auf der gezielten Beeinflussung des Materialbrechungsindexes im Wellenleiter. Die wichtigsten physikalischen Effekte, die zu diesem Zwecke in III-V-Halbleitern herangezogen werden können, sind der

part, en gravant un canal par attaque de surface, pour diminuer le rayonnement latéral sur le côté extérieur des éléments incurvés, d'où résulte un guidage latéral plus prononcé. Grâce à cette méthode, les pertes par déviation de rayonnement peuvent être maintenues à des valeurs négligeables [19]. On atteint ainsi des pertes totales d'environ 0,4 dB/90° pour des rayons de courbure de 200 µm [20].

332 Miroirs intégrés

Les miroirs de déviation intégrés constituent une alternative aux éléments incurvés. Il suffit de constituer une surface limite perpendiculaire au point de croisement de deux guides d'ondes par attaque de surface de la couche de guide d'ondes, vu que l'angle de réflexion totale pour des matériaux III-V par rapport à l'air se situe au-dessous de 20° dans la gamme de longueur d'ondes entrant en considération. Une déviation des rayons de 90° par un miroir placé à 45° est théoriquement *exempte de pertes.* La fabrication de tels miroirs exige toutefois des techniques particulières, pour obtenir des surfaces perpendiculaires de faible rugosité, gravées à une profondeur de plusieurs microns dans la structure de la couche III-V. Pour que les pertes par déviation soient inférieures à 1 dB, la précision de positionnement du miroir doit être meilleure que 10 % de la largeur du guide d'ondes (c'est-à-dire inférieure à 0,5 µm); son angle de rotation et son inclinaison (par rapport à l'axe vertical) doivent être inférieurs à 1° et la rugosité de surface ne devrait pas excéder sensiblement 10 nm [21].

Ces conditions ne peuvent être respectées que par le recours à des méthodes photolithographiques et à la technique d'attaque de surface à sec. Dans le cadre d'un projet de recherche, auquel coopère l'*Ecole polytechnique fédérale* de Zurich sous l'égide du projet européen Oscar consacré aux commutateurs optiques, l'Entreprise des PTT suisses étudie et développe des procédés d'attaque de surface à sec pour la fabrication de guides d'ondes à arêtes dans les couches de semi-conducteurs III-V et de miroirs en phosphure d'indium. Pour l'attaque de surface de semi-conducteurs III-V les gaz chlorés (Cl_2, CCl_4, $SiCl_4$) conviennent à la production de plasma (voir paragraphe 312). Lors de ce processus, et en raison de la faible pression de vapeur, des produits de réaction de l'indium ($InCl_x$) les substrats en phosphure d'indium doivent être maintenus à une température d'au moins 200° durant le procédé d'attaque de surface [22]. La *figure 9* montre un exemple d'une telle attaque de surface. En tant que masque, on a utilisé une laque épargne gravure traitée aux rayons ultraviolets, qui demeure indéformable jusqu'à 220°. On reconnaît cette couche de recouvrement à sa structure ondulée.

333 Commutateurs, modulateurs, convertisseurs et filtres

Comme mentionné, la fonction de la plupart des composants actifs résulte de l'influence précise exercée sur l'indice de réfraction du matériau dans le guide d'ondes. Les effets physiques les plus importants auxquels on

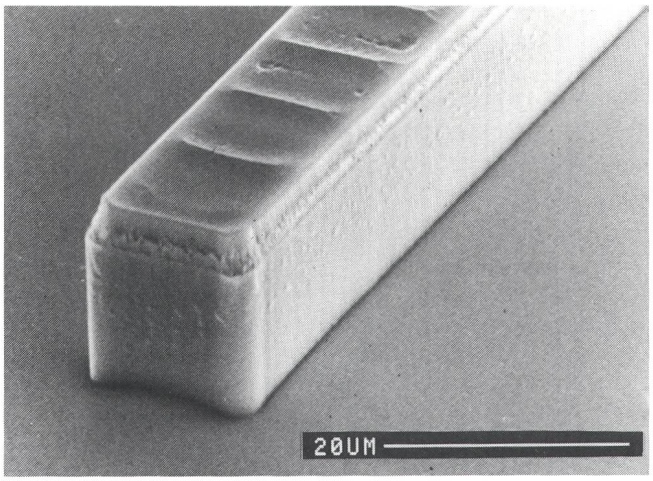

Fig. 9 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von einer durch reaktives Ionenätzen bei 220 °C im $SiCl_4$-Plasma erzeugten Struktur in Indiumphosphid – Reproduction au microscope électronique à balayage d'une structure en phosphure d'indium produite dans du plasma $SiCl_4$ par attaque ionique réactive à 220 °C

Man beachte die extrem saubere Oberfläche des geätzten Gebietes neben dem abgedeckten Streifen und die hohe Ätzanisotropie, die es erlaubt, genau senkrechte Wände (90° ± 1°) über 10 µm tief in das Substrat zu ätzen – A relever la surface extrêmement propre de la zone d'attaque à côté de la bande découverte ainsi que l'anisotropie d'attaque élevée qui permet de graver dans le substrat des paliers parfaitement perpendiculaires (90° ± 1°) d'une profondeur de plus de 10 µm

elektrooptische Effekt sowie ladungsträgerabhängige Brechungsindexänderungen durch Dotation oder Strominjektion, z. B. in einer pn-Diode. Die verschiedenen Ladungsträgereffekte (Plasma- und Bandfülleffekt, Energielückenschrumpfung) überlagern sich zu einem Gesamteffekt, der im wesentlichen proportional zur Ladungsträgerdichte zunimmt und im Wellenlängenbereich zwischen 1 und 1,5 µm Brechungsindexänderungen im Galliumarsenid oder Indiumphosphid bis über 0,01 ermöglicht [23]. Allerdings führen die dazu nötigen Ladungsträgerdichten von etwa 10^{19} cm^{-3} zu starker optischer Absorption und hohen Werten der elektrischen Bauteilkapazität. Ladungsträgereffekte sind vor allem zum Bau von richtungs- und *polarisationsunabhängigen Elementen* geeignet. Im Gegensatz dazu ist der *lineare elektrooptische Effekt (Pockels*-Effekt) kristallrichtungsabhängig. Bei den kubischen Kristallen von Galliumarsenid, Aluminiumarsenid und Indiumphosphid mit ihrer Zinkblendestruktur muss zwischen drei Fällen unterschieden werden, je nach der Richtung des angelegten elektrischen Feldes (*E*-Feld in der [100]-, [011]- oder [111]-Kristallrichtung). Von praktischer Bedeutung sind jedoch vor allem die zwei ersten Fälle, da dort für die Lichtein- und -auskopplung die natürlichen Kristallspaltflächen verwendet werden können. Diese beiden Fälle sind in *Figur 10* dargestellt. Mit einem *E*-Feld in [100]-Richtung (linkes Bild) erreicht man den grössten Effekt mit einer in die [011]-Richtung zeigenden Polarisation (sogenannte TE-Welle), während die TM-Welle nicht beeinflusst wird. Zeigt dagegen das *E*-Feld in Richtung [011] (rechtes Bild), so werden die beiden eingezeichneten Polarisationsrichtungen *gleich stark, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen* beeinflusst. Diese

peut recourir dans ce but pour les semi-conducteurs III-V sont l'effet électro-optique ainsi les modifications de l'indice de réfraction dépendantes des porteurs de charges par dopage ou injection de courant, dans une diode pn, par exemple. Les divers effets des porteurs de charges (effet de plasma et de remplissage interbandes, le rétrécissement des lacunes d'énergie) se superposent pour produire un effet global, qui augmente de manière pratiquement proportionnelle à la densité des porteurs de charges et qui permet des modifications de l'indice de réfraction de l'arséniure de gallium ou du phosphure d'indium allant jusqu'à 0,01 dans la gamme de longueur d'ondes située entre 1 et 1,5 µm [23]. Cependant, les densités des porteurs de charges nécessaires à cet effet d'environ 10^{19} cm^{-3}, conduisent à une absorption optique importante à des valeurs élevées de la capacité électrique des composants. Les effets dus aux porteurs de charges sont surtout favorables pour la construction d'*éléments indépendants de la direction de rayonnement et de la polarisation.* En revanche, l'*effet électro-optique linéaire (effet de Pockels)* est dépendant de l'orientation des cristaux. Pour les cristaux cubiques d'arséniure de gallium, d'arséniure d'aluminium et de phosphure d'indium, dont la structure est du type sphalérite, il convient de distinguer trois cas, selon le sens du champ électrique appliqué (défini en tant que sens [100], [011] ou [111] rapporté aux axes des cristaux). Ce sont cependant surtout les deux premiers cas qui revêtent une signification pratique, vu que l'injection et l'extraction de la lumière peut se faire par le biais des plans de clivage naturels des cristaux. Ces deux cas sont représentés à la *figure 10.* Pour un champ E dans le sens [100] (image de gauche) on obtient l'effet le plus important avec une polarisation de l'onde TE allant dans le sens [011], cependant que l'onde TM n'est pas influencée. Au contraire, si le champ *E* emprunte la direction [011] (image de droite), l'influence exercée sur les deux sens de polarisation indiqués est *d'égale valeur, mais de signe opposé.* Cette disposition se prête donc particuliè-

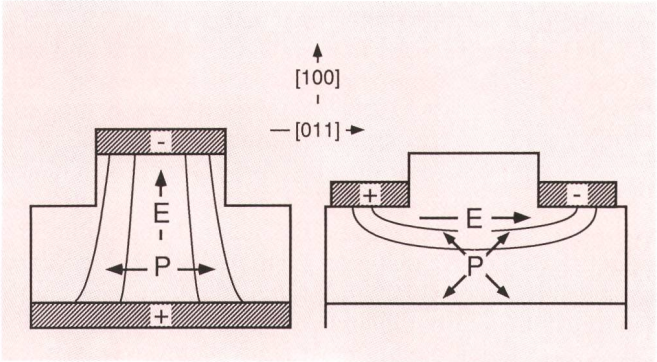

Fig. 10 Richtungsverhältnisse für elektrooptische III-V-Modulatoren – Sens des vecteurs de modulateurs III-V électro-optiques

Dargestellt ist der Querschnitt zweier Rippenwellenleiter parallel zur (01–1)-Einkoppelebene mit den nötigen Polarisationsrichtungen P für zwei Richtungen des elektrischen Feldes E (Feldlinien schematisch eingezeichnet). Die schraffierten Flächen stellen metallische Kontakte dar – Section transversale de deux guides d'ondes à arêtes parallèlement à la surface de couplage (01–1) avec les directions de polarisation P requises pour deux directions du champ électrique E (lignes de champ schématisées). Les surfaces hachurées représentent des contacts métalliques

Anordnung eignet sich deshalb besonders zum Bau von Polarisationskonvertern: Eine eingekoppelte TE- oder TM-Welle wird in die beiden eingezeichneten Polarisationsrichtungen aufgespalten, die sich gezielt gegeneinander verzögern lassen und sich damit am Ausgang zu einem neuen Polarisationszustand überlagern. Mit dem linearen elektrooptischen Effekt lassen sich Brechungsindexänderungen bis etwa 0,001 erzeugen, begrenzt durch die Durchbruchfeldstärke des Halbleiters als dem maximal anlegbaren *E*-Feld. Neben dem linearen besitzen die III-V-Halbleiter auch einen verhältnismässig starken *quadratischen elektrooptischen* Effekt (*Kerr*-Effekt). Dieser weist eine ausgeprägte Dispersion auf, was ihn für *wellenlängenselektive Elemente* (Multiplexer, Filter) interessant macht.

Zum Anlegen eines elektrischen Feldes über der Wellenleiterschicht können in Sperrichtung gepolte pn-Dioden oder *Schottky*-Kontakte (Metall-Halbleiter-Übergang) benützt werden. Um eine grosse Spannungsempfindlichkeit zu erreichen, muss das Feld möglichst gut mit dem optischen Strahlungsmodus überlappen. Dies ist mit einer *pn-Diode* ziemlich einfach zu erreichen, indem der pn-Übergang anschliessend an oder direkt in die Wellenleiterschicht gelegt wird. Damit lässt sich aber nicht vermeiden, dass sich ein Teil des Modenprofils in der unverarmten Zone des verhältnismässig hoch dotierten und damit absorptionsbehafteten Materials befindet. Abhilfe kann hier mit einer p-i-n-Struktur geschaffen werden, in der eine *i*ntrinsische (d. h. undotierte) Schicht den eigentlichen Wellenleiter bildet. Technologisch viel einfacher ist die Lösung mit dem Schottky-Kontakt: Erstens wird dadurch die Zahl der benötigten Epitaxieschichten vermindert, und zweitens muss auf der empfindlichen Wellenleiterstruktur kein ohmscher Kontakt gebildet, sondern nur eine geeignete Metallschicht (Aluminium, Gold oder Mehrschichtstrukturen wie Titan/Platin/Gold) aufgedampft werden. Der Nachteil dieser Lösung besteht darin, dass die Verarmungszone und damit das *E*-Feld mit zunehmender angelegter Sperrspannung ausgehend vom Metall-Halbleiter-Übergang in die Wellenleiterstruktur wächst. Dadurch wird die Überlappung mit dem Modenprofil asymmetrisch und spannungsabhängig, die Bauteilcharakteristik also nichtlinear, besonders weil zwischen Wellenleiterschicht und Kontaktmetall eine optische Isolation gebracht werden muss, die eine Absorption der geführten Welle durch die Elektrode verhindert.

Die Wahl der Struktur und der Schichtaufbau im einzelnen stellen also immer einen Kompromiss dar, den es für eine spezifische Anwendung zu optimieren gilt. Möglichst hohe Spannungsempfindlichkeit und lineare Charakteristik verlangen zum Beispiel nach dünnen Schichten. Anderseits führen diese aber zu erhöhten Verlusten (Substrat- und Elektrodenabsorption, Streuverluste) und zu geschwindigkeitsbegrenzenden Kapazitätswerten. In *Figur 11* ist ein typischer Doppelheterostruktur-Schichtbau dargestellt, wie er bei den PTT untersucht und zur Herstellung von Schaltelementen verwendet wird. Die Struktur ist für einen Rippen-Wellenleiter mit Schottky-Kontakt vorgesehen. Substrat- und Elektrodenabsorption sowie Verluste durch Abstrahlung ins Substrat können mit diesem Aufbau unter 0,5 dB/cm gehalten werden (typische Bauteillänge: 7...10 mm). Bei der Herstel-

rement bien à la construction de convertisseurs de polarisation: une onde injectée TE ou TM est décomposée dans les deux sens de polarisation représentés, qui peuvent être temporisés spécifiquement l'un par rapport à l'autre et conduisent ainsi à la sortie du dispositif par superposition, à un nouvel état de polarisation. Le recours à l'effet électro-optique linéaire permet d'obtenir des modifications de l'indice de réfraction atteignant environ 0,001, la limitation étant due au champ d'amorçage du semi-conducteur en tant que champ *E* maximal applicable. En plus de l'effet linéaire, les semi-conducteurs III-V possèdent aussi un effet *électro-optique quadratique* relativement important (effet de *Kerr*). Cet effet se distingue par une dispersion prononcée, ce qui le rend intéressant pour la construction d'*éléments sélectifs en longueur d'onde* (multiplexeurs, filtres).

Pour l'application d'un champ électrique par le biais d'une couche de guide d'ondes, on peut utiliser des diodes pn polarisées dans le sens inverse ou des contacts de *Schottky* (jonction métal – semi-conducteur). Pour atteindre une sensibilité élevée à de faibles tensions, il est nécessaire que le champ empiète autant que possible sur le mode de rayonnement optique. Un tel effet est relativement simple à obtenir avec une *diode pn,* par juxtaposition ou intégration directe de la jonction pn dans la couche du guide d'ondes. Cependant, on ne peut pas éviter qu'une partie du profil modal se trouve dans la zone non appauvrie du matériau relativement fortement dopé, donc dans le matériau à forte caractéristique d'absorption. Il est possible de parer à ces inconvénients par le recours à une structure p-i-n dans laquelle une couche intrinsèque (c'est-à-dire non dopée) constitue le guide d'ondes proprement dit. Une solution technologique beaucoup plus simple réside dans l'emploi du *contact de Schottky:* on peut ainsi diminuer le nombre des couches épitaxiales et, dans un deuxième temps, éviter de former un contact ohmique sur la structure sensible du guide d'ondes, et se limiter à l'application d'une couche métallisée sous vide appropriée (aluminium, or ou structures multicouches telles que titane, platine, or). L'inconvénient de cette solution réside dans le fait que la zone d'appauvrissement et, partant, le champ *E* s'accroît en fonction de la tension de blocage croissante appliquée à partir de la jonction métal – semi-conducteur de la structure de guide d'ondes. Il en résulte que l'empiètement avec le profil modal devient asymétrique et dépendant de la tension, que la caractéristique du composant perd sa linéarité, particulièrement en raison de l'isolation optique qui doit être apportée entre la couche du guide d'ondes et le contact métallique, isolation qui empêche une absorption de l'onde guidée par l'électrode.

Le choix de la structure et la constitution des couches en particulier représentent donc toujours un compromis, qu'il s'agit d'optimiser pour une application spécifique. Une sensibilité aussi élevée que possible à la tension et une caractéristique linéaire exigent, par exemple, des couches minces. Celles-ci conduisent, par ailleurs, à des pertes élevées (absorption par le substrat et l'électrode, pertes par dispersion) et à des valeurs de capacité qui limitent la vitesse de propagation. La *figure 11* montre une architecture de couches à héterostructure double typique, telle qu'on l'examine aux PTT et qu'on l'utilise

lung von Δβ-Richtkopplern kann mit der Stufenhöhe der Wellenleiterrippe die Kopplungslänge eingestellt werden. Der Aluminiumgehalt der Deckschicht wurde deshalb so gewählt, dass die benötigte grösste Stufenhöhe für die Wellenleiterrippe gerade etwas kleiner ist als die von den Verlusten her geforderte Mindestschichtdicke, so dass die Wellenleiterschicht auch neben der Rippe überdeckt bleiben kann. Die untere Mantelschicht weist einen tieferen Aluminiumgehalt auf, damit von der Struktur keine Moden höherer Ordnung getragen werden. Die erhöhte Dotation in dieser Schicht soll schliesslich das *E*-Feld auf den Wellenleiterkern konzentrieren. Nicht optimal ist bei dieser Struktur sicher die vertikale Asymmetrie, die sich in einem entsprechenden Modenprofil äussert [24].

Typische *Modulatoren* aus Aluminium-Galliumarsenid/Galliumarsenid erreichen Halbwellenspannungen von 10...20 V bei Bauteillängen von 5...10 mm, entsprechend einer spezifischen Empfindlichkeit (Phasenschiebung Länge und Spannung) von etwa 2 °/Vmm und Modulationstiefen von 10...15 dB. Mit Elektrodenkonfigurationen in Streifenleiter- oder Koplanartechnik wurden Modulationsbandbreiten von über 20 GHz erreicht [25]. Durch kompliziertere Schichtstrukturen können wesentlich höhere Spannungsempfindlichkeiten bei immer noch hoher Modulationsbandbreite erreicht werden: In einer Doppelheterostruktur, bei der zusätzlich der Wellenleiter als p-i-n-Schichtfolge in Galliumarsenid aufgebaut wurde, konnte eine Empfindlichkeit von 37,5 °/Vmm gemessen werden [26]. Dieser hohe Wert ist auf den zusätzlich wirksamen Ladungsträgereffekt zurückzuführen. *Modulatoren* aus Indium-Galliumarsenid-Phosphid/Indiumphosphid erreichen vergleichbare Leistungsdaten, waren aber bis vor kurzem noch stark mit inneren spezifischen Dämpfungswerten im Bereich von 10 dB/cm behaftet. In letzter Zeit wurden hier aber grosse Fortschritte gemacht, so dass heute Modulatoren mit internen Dämpfungswerten bis hinunter zu 1 dB herstellbar sind. Die beste Spannungsempfindlichkeit erreichte eine Multi-Quantum-Well-Struktur mit 120 °/Vmm [27]. Sie macht Gebrauch von der *E*-Feld-abhängigen Verschiebung des Energieniveaus (*Stark*-Effekt) und damit des Brechungsindexes. Die bloss 500 μm lange Struktur erreicht damit für Wellenlängen zwischen 1,566 und 1,568 μm eine Schaltspannung von 3 V bei einer Modulationstiefe von 19 dB und internen Verlusten von 2,5 dB.

34 Anschlusstechnik

Ernstzunehmen ist bei Elementen auf III-V-Halbleiterbasis die Verbindung mit optischen Glasfasern. Diese ist schwierig, weil erstens das Modenprofil eines Wellenleiters mit typischen rechteckigen Abmessungen von 1 × 3 bis 3 × 6 μm nicht an den zirkularen Modus einer Einmodenfaser mit einem Kerndurchmesser von 9 μm angepasst ist, und zweitens wegen des hohen Brechungsindexes des Halbleitermaterials, der zu hohen Reflexionsverlusten (etwa 30 %) führt. Das zweite Problem muss durch das Aufbringen von Antireflexschichten auf die Ein- und Auskoppelflächen des Halbleiterchips gelöst werden (siehe 322). Die Modenfehlanpassung verunmöglicht eine wirksame Direktkopplung («Butt»-Kopplung): Für einen Wellenleiterquerschnitt von

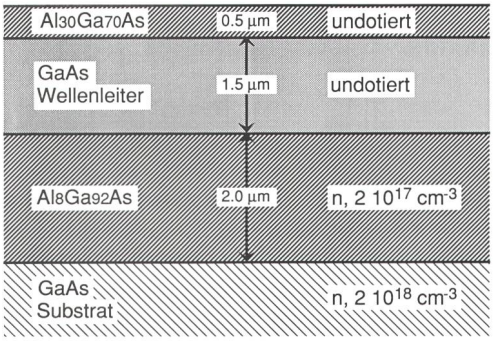

Fig. 11 Doppelheterostruktur-Schichtaufbau aus Aluminium-Galliumarsenid für elektrooptische Modulatoren mit optimierten Wellenleiterverlusten – Configuration par couches à double hétérostructure en AlGaAs pour modulateurs électro-optiques avec pertes optimisées dans les guides d'ondes

Al Aluminium – Aluminium
Ga Gallium – Gallium
As Arsen – Arsenic
GaAs Galliumarsenid – Arséniure de gallium
n negativ dotiert (n-dotiert) – A dopage négatif (dopé n)

pour la fabrication d'éléments de commutation. La structure est prévue pour la construction d'un guide d'ondes à arêtes avec contact de Schottky. Grâce à cette disposition, l'absorption dans le substrat et par l'électrode, ainsi que les pertes par rayonnement dans le substrat, peuvent être maintenues au-dessous de 0,5 dB/cm (longueur typique du composant: 7 à 10 mm). Lors de la fabrication de coupleurs directifs Δβ, la hauteur de l'encoche pratiquée dans l'arête du guide d'ondes permet de régler la longueur du couplage. La teneur en aluminium de la couche de recouvrement a été, de ce fait, choisie de manière que la plus grande hauteur de l'encoche du guide d'ondes à arêtes soit juste un peu inférieure à l'épaisseur minimale exigée par les pertes, de sorte que la couche de guide d'ondes reste recouverte à côté de l'arête également. La couche inférieure de la gaine possède une plus faible teneur en aluminium, afin qu'aucun mode d'ordre supérieur ne soit supporté par la structure. Le dopage plus poussé de cette couche doit finalement concentrer le champ E sur le cœur du guide d'ondes. L'asymétrie verticale n'est certes pas optimale dans cette structure, ce qui se traduit par un profil modal correspondant [24].

Des *modulateurs* typiques en arséniure d'aluminium et de gallium/arséniure de gallium atteignent des tensions demi-ondes de 10 à 20 V pour des longueurs de composants de 5 à 10 mm, ce qui correspond à une sensibilité spécifique (déphasage, longueur et tension) d'environ 2°/Vmm et des profondeurs de modulation de 10 à 15 dB. Avec des configurations d'électrodes en technique guide d'ondes latéral ou technique coplanaire, on a atteint des largeurs de bande de modulation dépassant 20 GHz [25]. Par l'utilisation de structures de couches plus compliquées, il est possible d'obtenir des sensibilités nettement plus élevées à l'égard des tensions faibles, tout en conservant une largeur de bande de modulation élevée: Dans une hétérostructure double, dans laquelle le guide d'ondes a été monté en plus en tant que succession de couches p-i-n en arséniure de gallium, on

1,5 μm × 5 μm wäre beispielsweise eine Kopplungsdämpfung von etwa 6 dB zu erwarten. Die Modenfelder müssen deshalb durch optische Abbildungselemente angepasst werden.

Die einfachste, aber schwer kontrollierbare Möglichkeit besteht im Anschmelzen einer sphärischen Oberfläche an das Faserende. Flexiblere Lösungen können durch die Verwendung von Mikrokugellinsen, zylinderförmigen (*«rod»*) Linsen mit abgestuftem Index (Grin-Linsen) oder holographischen Elementen erreicht werden. Dabei gilt es, die einzelnen Komponenten sehr präzise gegeneinander auszurichten und zu fixieren. Dies kann in *Flip-chip-Technik* geschehen, indem die integriert-optische Schaltung mit der aktiven Fläche nach unten auf ein Trägersubstrat aus Silizium montiert wird, in dessen Oberfläche vorgängig die zur Aufnahme der Anschlussfasern und der Abbildungselemente nötigen Vertiefungen geätzt wurden. Diese können so ausgelegt werden, dass die Montage selbstausrichtend abläuft. Dies ergibt einen sehr kompakten Aufbau mit hoher, nur durch die fotolithographische Strukturiertechnik begrenzter Ausrichtgenauigkeit. Eine Montagetechnik, die veränderten Bauteilabmessungen besser angepasst werden kann, bedingt eine mechanisch aufwendigere Lösung. Dies war das Thema eines Entwicklungsprojektes, das im Auftrag der Generaldirektion PTT bei *AscomTech* durchgeführt wurde [28]. Die Lösung besteht aus einem metallischen Trägerblock für das integriert-optische Element und die Treiberschaltung sowie einem Metallbügel zur Aufnahme der Linsen und Anschlussfasern. Nach Ausrichtung auf der optischen Bank werden alle Teile durch Mikroschweissen mit einem Nd:YAG-Laser verbunden. Die geforderten Toleranzen von 1...2 μm können damit eingehalten werden, und Kopplungsgrade von mehr als 70 % bei guter mechanischer und thermischer Stabilität wurden erreicht.

Die Montage- und Verpackungstechnik ist aufwendig und entsprechend teuer. Bei kommerziellen Halbleiterlasern der Spitzentechnologie macht sie etwa 90 % der gesamten Gestehungskosten aus. Die Ausrüstung von Teilnehmeranlagen und Endgeräten mit solchen Modulen erscheint deshalb heute noch problematisch. Je höher der Integrationsgrad einer optoelektronischen Schaltung ausfällt, um so wirtschaftlicher wird sie auch aufgrund der Montagetechnik.

35 Optoelektronische integrierte Schaltungen

Im Unterschied zur Silizium-Integrationstechnik, die rein elektronische Funktionen umfasst, müssen bei optoelektronisch integrierten Schaltungen Elemente mit verschiedensten Funktionen nebeneinander hergestellt werden. Die Kriterien für den Schichtaufbau sind für die einzelnen Elemente entsprechend unterschiedlich. Einerseits können die verschiedenen Schichtfolgen daher nicht mehr wie bei Einzelkomponenten unabhängig voneinander optimiert werden. Die nötigen Kompromisse führen unter Umständen zu nichtidealer Elementcharakteristik. Anderseits verhinderte diese Problematik bis heute eine Integrationsdichte, die mit jener der Siliziumtechnologie vergleichbar ist.

a mesuré une sensibilité de 37,5°/Vmm [26]. Cette valeur élevée est due à l'effet supplémentaire des porteurs de charges. Les *modulateurs* à base de phosphure et d'arséniure d'indium et de gallium/et de phosphure d'indium atteignent des caractéristiques comparables, mais étaient, il y a peu encore, entachés de fortes atténuations spécifiques internes dans la plage de 10 dB/cm. Ces derniers temps, de grands progrès ont été réalisés, de sorte que les modulateurs actuels peuvent être réalisés avec des valeurs d'atténuation internes atteignant 1 dB. La meilleure sensibilité aux tensions faibles a été atteinte par une structure «Multi-Quantum-Well» avec 120°/Vmm [27]. Dans cette structure, on utilise un décalage du niveau énergétique dépendant du champ E (effet de Stark) et, de ce fait, de l'indice de réfraction. Cette structure longue seulement de 500 μm réagit à une tension de commutation de 3 V pour une profondeur de modulation de 19 dB et des pertes internes de 2,5 dB pour des longueurs d'ondes entre 1,566 et 1,568 μm.

34 Technique de raccordement

Un problème sérieux réside dans le raccordement des éléments semi-conducteurs III-V aux fibres optiques. Cette opération est difficile, d'une part, parce que le profil modal d'un guide d'ondes à section typiquement rectangulaire de 1 × 3 à 3 × 6 μm n'est pas adapté aux mode circulaire d'une fibre monomode ayant un diamètre de cœur de 9 μm et, d'autre part, en raison de l'indice de réfraction élevé du matériau semi-conducteur, qui conduit à des pertes par réflexions élevées (environ 30 %). Le deuxième problème doit être résolu par l'apport de couches antiréflexion sur les surfaces d'extremité des puces (voir 322). La désadaptation modale empêche un couplage direct efficace (couplage *«Butt»):* Il faudrait, en effet, s'attendre à un affaiblissement de couplage d'environ 6 dB, par exemple, pour une section de guide d'ondes de 1,5 × 5 μm. Les aberrations modals doivent donc être corrigés par des éléments d'adaptation optiques.

La possibilité la plus simple mais aussi la plus difficilement contrôlable consiste dans l'apport par fusion d'une sphère à l'extrémité de la fibre. Des solutions offrant une plus haute flexibilité peuvent être réalisées par l'emploi de microlentilles sphériques, de lentilles de forme cylindrique *(«Rod»)* à indice échelonné (lentilles de Grin) ou d'éléments holographiques. Il s'agit en l'occurrence d'aligner et de fixer les divers composants avec une très haute précision. On peut y parvenir par la *technique Flip-chip* qui consiste à monter le circuit intégré optique avec la surface active vers le bas sur un substrat en silicium dont la surface a été pourvue au préalable par attaque de cavités permettant la connexion de fibres de raccordement et des éléments d'adaptation. Ces cavités peuvent être disposées de manière que le montage soit réalisable par auto-alignement. Il en résulte une structure très compacte, dont la précision d'alignement n'est limitée que par la technique de structuration photolithographique. Une technique de montage mieux adaptée aux diverses dimensions des composants exige une solution mécanique plus sophistiquée. Tel était le thème d'un projet de développement réalisé sur mandat de la

Grundsätzlich kann die Integration horizontal oder vertikal geschehen. Bei der *horizontalen Integration* werden die verschiedenen Elemente nebeneinander angeordnet. Das bedingt selektive Ätz- und Epitaxieprozesse in mehreren Teilschritten. Die *vertikale Integration* kommt dagegen mit einem einzigen Epitaxieschritt aus, in dem sämtliche Schichten übereinander angeordnet werden. Die verschiedenen Elementebenen werden anschliessend durch Ätzen lokal freigelegt. Als Nachteil muss eine ausgeprägt unebene Oberfläche in Kauf genommen werden, was hohe Anforderungen an die Fotolithographie stellt.

Bereits gebaut worden sind u. a. [29]:

- ein Sendermodul mit integrierter Treiberstufe und Monitorfotodiode für Datenraten bis 2 Gbit/s in Galliumarsenid-Technik
- zwei Laser in Indium-Galliumarsenid-Phosphid-Technik mit Direktkopplung an einen integrierten Wellenleiterschalter
- ein auf Galliumarsenid integriertes Detektormodul mit 52 Bauteilen, umfassend eine *MSM*-Fotodiode (*M*etal *S*emiconductor *M*etal) und einen *MESFET*-Transimpedanzverstärker (*M*etal *S*emiconductor *F*ield *E*ffect-*T*ransistor).

Ein Beispiel vertikaler Integration in Indium-Galliumarsenid-Phosphid/Indiumphosphid [30] ist ein polarisationsabhängiger (polarization diversity) Empfänger für kohärente Detektion nach der «Dual-Balanced-Detector»-Methode, die direkt die Zwischenfrequenz des Übertragungskanals liefert. Das Modul besitzt je einen Wellenleitereingang für den Signalkanal und den Lokaloszillator. Beide Eingangskanäle gelangen in je einen Polarisationsaufspalter und werden dann polarisationsgetrennt in zwei 3-dB-Kopplern gemischt. Die gegenphasigen Ausgangssignale beider Koppler werden auf vier Detektoren geführt und die Zwischenfrequenzen durch Differenzbildung direkt herausgefiltert. Die Signale beider Polarisationen werden schliesslich addiert. *Figur 12* zeigt einen schematischen Querschnitt der Detektorregion. Die Schichtfolge aus *Indiumphosphid/Indium-Galliumarsenid-Phosphid/Indiumphosphid* ergibt eine *Wellenleiterstruktur* auf einem teilisolierenden Indiumphosphid-Substrat und zwei darüberliegenden *Detektorschichten* aus *Indium-Galliumarsenid,* die untere undotiert und die obere p-leitend. Zusammen mit der n^+-implantierten Substratregion bildet diese Schichtfolge eine p-i-n-Diode, deren absorbierende Indium-Galliumarsenid-Schicht über das Streufeld an den Wellenleiter gekoppelt ist. Detektorempfindlichkeiten von 20 dB/mm wurden erreicht. Die gegenseitige Isolation zweier Detektoren geschieht über das Substrat. Ausserhalb der Detektoren werden die Wellenleiter nach dem Wegätzen der Indium-Galliumarsenid-Schichten durch Rippen in der oberen Indiumphosphid-Schicht strukturiert. Der Polarisationsaufspalter (in Fig. 12 nicht gezeigt) ist eine Wellenleiterkoppelstrecke, für die der benötigte Unterschied in der Koppellänge für die TE- und TM-Modi durch eine Metallisierung der Rippe des einen Kopplerarmes erreicht wurde. Die gemessene TE/TM-Übersprechdämpfung betrug 15...20 dB.

Direction générale de PTT par *AscomTech* [28]. Le problème a été résolu par la combinaison d'un bloc métallique supportant l'élément optique intégré et le circuit d'attaque avec un étrier métallique sertissant les lentilles et les fibres de raccordement. Après alignement sur le banc optique, tous les éléments sont reliés par microsoudure au moyen d'un laser Nd:YAG. Les tolérances exigées de 1 à 2 µm peuvent ainsi être respectées et des degrés de couplage supérieurs à 70 % ont été atteints offrant une bonne stabilité mécanique et thermique.

La complexité de la technique de montage et d'encapsulation se traduit par des frais élevés. Pour les lasers semi-conducteurs de la technologie de pointe en vente dans le commerce, cette technique représente environ 90 % des coûts de fabrication globaux. C'est pourquoi il paraît aujourd'hui encore problématique d'équiper des installations d'usagers et des terminaux de tels modules. Plus le degré d'intégration d'un circuit optoélectronique est poussé, plus la technique de montage de cet élément se révèle économique.

35 Circuits intégrés optoélectroniques

A la différence de la technique d'intégration au silicium, qui comprend des fonctions purement électroniques, il est nécessaire de fabriquer côte à côte des éléments assurant les fonctions les plus diverses dans les circuits intégrés optoélectroniques. Les critères de structures des couches sont donc essentiellement différents pour les divers éléments. Les successions des diverses couches ne peuvent de ce fait plus être optimisées indépendamment les unes par rapport aux autres, comme dans les composants discrets. Les compromis nécessaires conduisent parfois à des caractéristiques d'élément non idéales. D'autre part, cette problématique a empêché jusqu'ici d'obtenir une densité d'intégration comparable à celle de la technologie du silicium.

Par principe, la topologie d'intégration peut être horizontale ou verticale. Dans le cas de l'*intégration horizontale,* les divers éléments sont disposés côte à côte. Cette technique nécessite des processus d'attaque de surface et d'épitaxie en plusieurs phases. L'*intégration verticale* peut, en revanche, être réalisée en une seule étape d'épitaxie, consistant à empiler toutes les couches. On rend ensuite les différents niveaux de l'élément accessibles par attaque de surface localisée. L'inconvénient réside dans une surface d'une planéité très inégale qui pose des exigences élevées aux travaux de photolithographie.

On a déjà construit entre autres [29]:

- un module d'émission comprenant un étage d'attaque intégré et une photodiode monitrice pour des débits jusqu'à 2 Gbit/s en technique d'arséniure de gallium
- deux lasers en technique phosphure et arséniure d'indium et de gallium avec couplage direct à un commutateur de guide d'ondes intégré
- un modul détecteur intégré à base d'arséniure de gallium comprenant 52 composants, dont une photo-

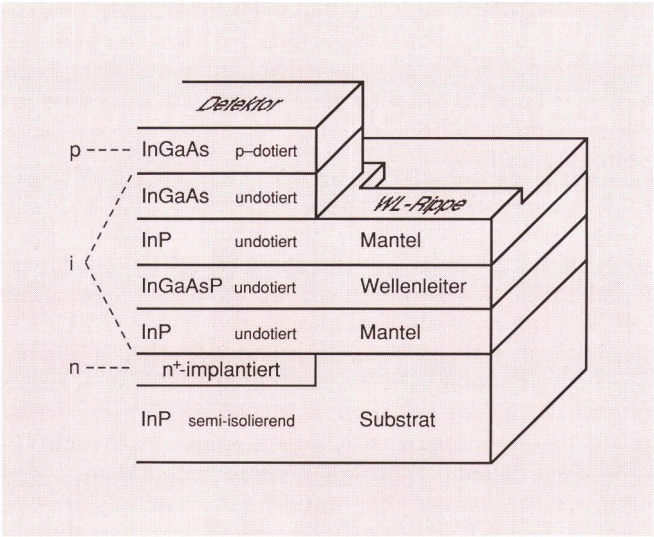

Fig. 12 Vertikale Integration eines Doppelheterostruktur-Wellenleiters aus Indium-Galliumarsenid-Phosphid mit einem Detektor aus Indium-Galliumarsenid als Teil eines Empfängermoduls – Intégration verticale d'un guide optique à double hétérostructure en InGaAsP avec un détecteur en InGaAs faisant partie d'un module de récepteur

Gezeigt ist der schematische Querschnitt der Detektorregion. Das optische Signal gelangt von rechts über den Rippenwellenleiter in die p-i-n-Diode – Coupe schématique transversale de la région détectrice. Le signal optique est acheminé depuis la droite vers la diode p-i-n en empruntant le guide d'onde à arêtes

4 Ausblick

Glas- und Lithiumniobat-Elemente, vor allem Modulatoren und Schalter, sind heute bereits kommerziell erhältlich und werden in einzelnen Fällen schon in Messinstrumenten eingesetzt. Meist handelt es sich jedoch noch um Labormodelle mit entsprechend hohen Preisen. Für eine breitere Anwendung muss in den nächsten Jahren der Übergang zu massenproduzierten, kompakten, komplexen Schaltkreisen stattfinden.

III-V-Komponenten sind noch weniger weit entwickelt, besonders die elektronischen Komponenten in Indiumphosphid-Systemen. Die Entwicklung auf dem Gebiet der Laserdioden führte aber in letzter Zeit zu raschen technologischen Fortschritten, die sich auf die integriert-optischen Anwendungen von III-V-Halbleitern äusserst erfolgversprechend auswirken.

Als Alternative zur III-V-Transistortechnologie – mit Blick auf eine vollständig monolithische Integrationstechnik – werden in letzter Zeit die Möglichkeiten einer Art integrierten Hybridtechnik studiert, bei der III-V-Schichten auf Silizium aufgebracht werden. Dies ermöglicht optische Elemente in III-V-Technologie mit elektronischen Komponenten in Silizium auf einem Silizium-Substrat zu vereinigen und damit den grossen technologischen Vorsprung der Elektronik auf Silizium auszunützen. Ob diese Technologie gegenüber der monolithischen eine Chance hat, wird die Zukunft zeigen. Die Hauptschwierigkeit ist hier die noch ungenügende Kristallqualität der auf Silizium aufgewachsenen III-V-Schichten.

diode MSM (*M*etal *S*emiconductor *M*etal) et un amplificateur transimpédance MESFET (*M*etal *S*emiconductor *F*ield *E*ffect-*T*ransistor).

Un exemple de structure d'intégration verticale à base de phosphure et d'arséniure de gallium et d'indium/phosphure d'indium [30] est un récepteur indépendant de la polarisation (polarization diversity) pour une détection cohérente selon la méthode «Dual Balanced Detector», qui fournit directement la fréquence intermédiaire du canal de transmission. Le module comprend une entrée de guide d'ondes pour le canal de signalisation et une autre entrée pour l'oscillateur local. Les deux canaux d'entrée parviennent chacun à un dispositif de décomposition de polarisation et sont ensuite, après séparation des deux modes de polarisation, mélangés dans deux coupleurs 3 dB. Les signaux de sortie en opposition de phase des deux coupleurs sont dirigés sur quatre détecteurs et les fréquences intermédiaires directement extraites par filtrage après différenciation. Les signaux des deux modes de polarisation sont finalement additionnés. La *figure 12* montre une coupe schématique de la région détectrice. La succession des couches en *phosphure d'indium/arsiénure et phosphure de gallium et d'indium/phosphure d'indium* débouche sur une *structure de guide d'ondes* sur un substrat de phosphure d'indium procurant un isolement partiel et sur deux *couches détectrices* superposées en *arséniure de gallium et d'indium,* la couche inférieure n'étant pas dopée et la couche supérieure étant conductrice p. Cette succession de couches, combinée à une région de substrat implantée n^+ forme les couches d'une diode p-i-n, dont la couche absorbante d'arséniure de gallium et d'indium est couplée au guide d'ondes par le biais du champ de dispersion. Des sensibilités de détection de 20 dB/mm ont été atteintes. L'isolation réciproque des deux détecteurs est assurée par le substrat. En dehors des détecteurs, les guides d'ondes sont structurés par des arêtes dans la couche supérieure en phosphure d'indium après suppression par attaque de surface des couches d'arséniure de gallium et d'indium. Le dispositif de décomposition de polarisation (non représenté sur la fig. 12) consiste en un trajet de couplage de guides d'ondes pour lequel la différence de la longueur de couplage pour les modes TE ou TM a été réalisée par une métallisation de l'arête de l'un des bras de couplage. L'atténuation de diaphonie mesurée entre TE et TM était de 15 à 20 dB.

4 Perspectives

On peut, aujourd'hui déjà, obtenir dans le commerce des éléments en verre et en niobate de lithium, en premier lieu des modulateurs et des commutateurs, qui sont, dans certains cas, déjà montés dans des instruments de mesure. Dans la plupart des cas, il s'agit pourtant de modèles de laboratoire dont le prix est élevé en conséquence. Pour que ces éléments puissent connaître une large diffusion ces prochaines années, il faudra passer à la production de masse de circuits de commutation complexes de structure compacte.

Les composants III-V sont encore moins évolués, en particulier les composants électroniques des systèmes fon-

dés sur le phosphure d'indium. Pourtant, ces derniers temps, le développement dans le domaine de diodes laser a conduit à des progrès technologiques rapides, qui sont extrêmement prometteurs en ce qui concerne les applications de l'optique intégrée fondée sur les semiconducteurs III-V.

En tant que variante de la technologie des transistors III-V – et dans la perspective d'une technique d'intégration monolithique intégrale – on étudie ces derniers temps les possibilités d'un genre d'intégration de la technique hybride, qui consiste à appliquer des couches III-V sur du silicium. Cela permet de réunir des éléments optiques en technologie III-V avec des composants électroniques en silicium sur un substrat en silicium et de tirer partie de la grande avance technologique de l'électronique. Seul l'avenir montrera si cette technologie à des chances de s'imposer par rapport aux structures monolithiques. La difficulté principale réside dans la qualité insuffisante des cristaux des couches III-V produits par épitaxie sur un substrat de silicium.

Bibliographie

[1] *Tien P. K.* Integrated optics and new wave phenomena in optical waveguides, Reviews of Modern Physics 49, 361 (1977).

[2] *Takato N., Jinguji K., Yasu M., Toba H.* and *Kawachi M.* Silica-based single-mode waveguides on Si and their application to guided-wave optical interferometers, J. Lightwave Technol. 6, 1003 (1988).

[3] *Korotky S. K.* and *Alferness R. C.* Ti:$LiNbO_3$ integrated optic technology, in Integrated Optical Circuits and Components, L. D. Hutcheson, editor; Marcel Dekker, New York (1987).

[4] *Schmidt R. V.* and *Alferness R. C.* Directional coupler switches, modulators, and filters using alternating techniques, IEEE Transactions on Circuits and Systems CAS-26, 1099 (1989).

[5] *Olshansky R., Powazinik W., Hill P., Lanzisera V.* and *Lauer R. B.* InGaAsP buried heterostructure laser with 22 GHz bandwidth and high modulation efficiency, Electronics Letters 23, 839 (1987).

[6] *Béguin C.* Kohärente optische Übertragung, Techn. Mitt. PTT, 67 (1989) 5, S. 230.

[7] *Kotaki Y., Ogita S., Matsuda M., Kuwahara Y.* and *Ishikawa H.* Tunable, narrow linewidth and high power 1/4 shifted DFB laser, paper 19A2-4 at the 7th Int. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communications, IOOC '89, Kobe, Japan (1989).

[8] *Matsui Y., Kunii T., Horikawa H.* and *Kamijoh T.* Extremely narrow linewidth 1.5/m multiple quantum well distributed Bragg reflector lasers entirely grown by MOVPE, paper FB2 at the Optical Fiber Communication Conference, OFC '91, San Diego, USA (1991).

[9] *Faist J., Ganière J.-D., Buffat Ph., Sampson S.* and *Reinhart F.-K.* Characterization of GaAs/$(GaAs)_n(AlAs)_m$ surface-emitting laser structures through reflectivity and high resolution electron microscopy measurements, J. Appl. Phys. 66, 1023 (1989).

[10] *Soda H., Iga K., Kitahara C.* and *Suematsu Y.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers, Jpn. J. Appl. Phys. 18, 2329 (1979).

[11] *Iga K.* Surface operating electrooptic devices and their application to array parallel signal processing, paper WeB2.1 at the European Conference on Optical Communication, ECOC '90, Amsterdam, The Netherlands (1990).

[12] *Simon J. C.* GaInAsP semiconductor laser amplifiers for single-mode fiber communications, J. Ligthwave Tech. LT-5, 1286 (1987).

[13] *Durhuus T., Mikkelsen B.* and *Stubkjaer K. E.* Influence of residual facet reflectivity on nonlinearities in semiconductor optical amplifiers, Electronics Letters 27, 310 (1991).

[14] *Besse P. A.* Erarbeitung von Unterlagen für die Herstellung von integrierten optischen Verstärkern und Modulatoren mit III-V-Homo- und -Heterostrukturpn-Übergängen, Schlussbericht zum F+E-Projekt 134, ETH Zürich (1989).

[15] *Lau K.* Polarization-independent semiconductor optical amplifier module using twin-graded index rod lenses, paper FB1 at the Optical Fiber Communication Conference, OFC '91, San Diego, USA (1991).

[16] *Kasukawa A., Matsumoto N., Murgatroyd I. J., Imajo Y., Okamoto H.* and *Kashiwa S.* 100 mW output power GaInAsP buried graded index-separate-confinement heterostructure multi quantum-well (GRIN-SCH-MQW) laser diodes entirely grown by MOCVD, paper WeB14-5 at the European Conference on Optical Communication, ECOC '89, Gothenburg, Sweden (1989).

[17] *Carenco A.* Semiconductor waveguides in III-V materials for integrated optics, Proceedings of the European Conference on Integrated Optics, ECIO '87, Glasgow, Scotland, 1 (1987).

[18] *Deri R. J., Thurston R. N.* and *Hawkins R. J.* Scattering losses in single and double heterostructure semiconductor optical rib waveguides, Electronics Letters 27, 483 (1991).

[19] *Gu J. S., Melchior H.* and *Guekos G.* Design of low-loss curved integrated optical rib waveguides, paper W3 at the European Conference on Optical Integrated Systems at Amsterdam, ECOISA '89, Amsterdam, The Netherlands (1989).

[20] *Verbeek B. H., Pennings E. C. M., van Uffelen J. W. M.* and *Thijs P. J. A.* Fabrication and analysis of low-loss InGaAsP/InP optical waveguides with extremely small bends, paper PDB-9 at the European Conference on Optical Communication, ECOC '89, Gothenburg, Sweden (1989).

[21] *Buchmann P.* GaAs Komponenten der integrierten Optik für externe Modulation in optischen Kommunikationssystemen, Dissertation der ETH Zürich Nr. 8425 (1987).

[22] *Schneider J.* Temperature dependent reactive ion etching of InP with chlorine-based gases for vertical sidewalls, phase report for RACE project 1033, Bericht der Generaldirektion PTT VM25.040 (1991).

[23] *Bennett B. R.* and *Soref R. A.* Bandfilling electro-optic effect in InP, GaAs, GaSb, InAs, and InSb, Proc. SPIE 994, Optoelectronic Materials, Devices, Packaging, and Interconnects II, 168 (1988).

[24] *Deutsch Ch.* Nahfeld-Messungen an integriert-optischen Strukturen, Bericht der Generaldirektion PTT VM26-102 (1989).

[25] *Wang S. Y., Lin S. H.* and *Houng Y. M.* GaAS traveling-wave polarization electro-optic waveguide modulator with bandwidth in excess of 20 GHz at 1,3 μm, Appl. Phys. Lett. 51, 83 (1987).

[26] *Lee S. S., Kim Y. S., Ramaswamy R. V.* and *Sundaram V. S.* Highly efficient separate-confinement PpinN GaAS/AlGaAs waveguide phase modulator, Appl. Phys. Lett. 55, 1865 (1989).

[27] *Bryce A. C., Marsh J. H., Taylor L. L., Bass S. J.* and *Guy D. R. P.* Large modulation depth, single-moded quantum well waveguide modulator operating around 1,57 μm, Electronics Letters 27, 304 (1991).

[28] *Hasler R., Reber F., Valk B.* und *Zimmer Ch.* Optoelektronische Anschlusstechnik am Beispiel eines Teilnehmermoduls mit reflektivem optischem Modulator, Schlussbericht zum F+E Projekt 175Z, AscomTech AG (1991).

[29] *Wehmann H.-H.* und *Schlachetzki A.* Integrierte Optik mit Halbleitern für die optische Nachrichtentechnik, Laser und Optoelektronik 21, 42 (1989).

[30] *Erman M., Riglet P., Gamonal R., Jarry P., Chané J. P.* and *Thijs P.* The integration of wave guides, optical devices and detectors on InP for implementation in optical diversity coherent receivers, paper ThB20-1 at the European Conference on Optical Communication, ECOC '89, Gothenburg, Sweden (1989).

Zusammenfassung

Integrierte Optik

Die Autoren vermitteln den neuesten Technologiestand für die integrierte Optik auf der Grundlage von Glas und Lithiumniobat ($LiNbO_3$) sowie von III-V-Halbleitern. Es werden Herstellung und Funktion der wichtigsten Bauelemente einer integriert-optischen Schaltung beschrieben und Entwicklungstendenzen in Richtung neuer Möglichkeiten für künftige optische Kommunikationssysteme gezeigt. Jede der drei Materialklassen bietet je nach Anwendung ihre besonderen Vorteile. Deshalb ist zu erwarten, dass alle drei Technologien noch für längere Zeit nebeneinander bestehen werden, obschon nur die Halbleitertechnologie mit Galliumarsenid (GaAs) und Indiumphosphid (InP) eine umfassende Integrationstechnik zulässt.

Résumé

Optique intégrée

Les auteurs décrivent le niveau actuel de la technique dans le domaine de l'optique intégrée fondée sur l'utilisation du verre ainsi que du niobiate de lithium et des semi-conducteurs III-V. Ils exposent le procédé de fabrication et les fonctions des principaux composants d'un circuit optique intégré et montrent les tendances du développement de nouvelles possibilités en matière de systèmes de communication optiques. Chacune des trois catégories de matériau mentionnées offre des avantages particuliers suivant l'application choisie. Il faut donc s'attendre à ce que les trois techniques continuent de coexister encore pendant un certain temps, bien que seule la technique des semiconducteurs fabriqués à base d'arséniure de gallium (GaAs) et de phosphure d'indium (InP) permette une intégration complète.

Riassunto

Ottica integrata

Gli autori presentano lo stato attuale della tecnica nel campo dell'ottica integrata, sulla base di vetro, del niobato di litio e di semiconduttori III-V. Descrivono la produzione e il funzionamento dei principali componenti di un circuito ad ottica integrata e illustrano in che direzione va lo sviluppo dei futuri sistemi di comunicazione ottici. A seconda del campo d'applicazione, ognuna delle tre categorie di materiale offre vantaggi. Per questo motivo si suppone che tutte e tre le tecnologie continueranno ad essere applicate ancora per lungo tempo, benchè solamente quella dei semiconduttori all'arsenuiro di gallio e al fosfuro di indio preveda una tecnica d'integrazione completa.

Summary

Integrated Optics

The authors present the latest state of technology for integrated optics on the basis of glass as well as Lithiumniobate and the III-V semiconductors. The manufacturing process and the function of the most important components of an integrated optical circuit is described and trends towards new possibilities for future optical communications systems are shown. Each of the three classes of material offers particular advantages depending on the application. Therefore it can be expected that all three technologies will coexist for some time, even though only the gallium arsenide and indium phosphide semiconductor technology allows an extensive integration.