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: 7

Artikel: Integrierte Optik. 1. Teil = Optique intégrée. 1re partie

Autor: Affolter, Niklaus C. / Deutsch, Christian

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-873993

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 (1.Teil)
Optique intégrée (1re partie)

Niklaus C. AFFOLTER und Christian DEUTSCH, Bern

1 Einleitung

Die *Integrierte Optik* steht seit rund 20 Jahren im Blickpunkt des Interesses. Nach der Einführung der Glasfaser als Übertragungsmedium in der Telekommunikation verspricht sie neue Möglichkeiten für die künftige Schalt- und Vermittlungstechnik und für die Signalverarbeitung. Die für fiberoptische Kommunikationssysteme nötigen optischen und elektronischen Komponenten werden heute in *hybrider* Technik zu optoelektronischen Modulen zusammengebaut. Die Entwicklungstendenzen (dienstintegrierende Breitbandnetze: ISDN, «Fiber to the Home») bedingen sowohl eine zunehmende Bauteilevielfalt und -komplexität wie auch höhere Stückzahlen. Damit geht der Wunsch nach vermehrter Integration der verschiedenen Funktionsgruppen und nach gemeinsamen Produktionstechnologien einher, um einerseits die Zuverlässigkeit der Komponenten zu erhöhen und anderseits die Herstellungskosten und damit den Stückpreis herabzusetzen. Damit würde es wirtschaftlich möglich, auch Endgeräte mit solchen Komponenten auszurüsten.

Integrierte Optik hat für die optische Nachrichtentechnik eine ähnliche Bedeutung wie integrierte Schaltungen für die Elektronik. Sollen diskrete optische Komponenten kombiniert und für die Signalverarbeitung eingesetzt werden, müssen sie auf einem vibrationsisolierten Labortisch aufgebaut werden. Dies ist für industrielle Anwendungen unbrauchbar. Deshalb begann man schon Ende der sechziger Jahre mit der Integration optischer Strukturen, die, ähnlich der Integration elektronischer Schaltungen, mehrere Elemente in Miniaturform auf einer Unterlage (Chip) kombiniert. Es wurden Konzepte erarbeitet, die erlauben, verschiedenste Elemente wie Wellenleiter, Spiegel, Linsen, Prismen, Gitterkoppler, Polarisatoren, Modulatoren und Laser zu integrieren [1].

Optisch integrierte Schaltungen *(OIC, O*ptical *I*ntegrated *C*ircuit) bieten eine Reihe von Vorteilen gegenüber herkömmlichen optischen Systemen mit verhältnismässig grossen diskreten Elementen. Die Hauptvorteile sind:

- hohe Bandbreite
- Wellenlängenmultiplexierung möglich
- Koppler mit niedrigen Verlusten herstellbar
- kleine Abmessungen, kleines Gewicht, geringer Stromverbrauch
- Massenfabrikation möglich
- hohe Zuverlässigkeit
- Unempfindlichkeit gegen Erschütterungen.

1 Introduction

L'*optique intégrée* est au centre de l'actualité depuis une vingtaine d'années. Après l'introduction de la fibre optique en tant que support de transmission en télécommunications, elle ouvre de nouvelles perspectives à la future technique de commutation et de transmission ainsi qu'au conditionnement des signaux. Les composants optiques et électroniques exigés par les systèmes de communication à fibres optiques sont aujourd'hui groupés sous la forme de modules opto-électroniques selon la technique *hybride.* Les tendances du développement (réseaux large bande à intégration de services: RNIS, «fibre tous ménages») supposent aussi bien une diversité et une complexité croissantes des éléments que des nombres plus élevés de pièces. Cette exigence s'accompagne du désir d'intégrer davantage les différents modules et d'uniformiser les procédés de fabrication afin d'augmenter d'une part la fiabilité des composants et, d'autre part, de réduire les coûts de la fabrication et, partant, le prix par pièce. Ainsi, il deviendrait économiquement possible d'équiper également les terminaux de tels composants.

L'optique intégrée a pour les télécommunications optiques une importance semblable à celle des circuits intégrés pour l'électronique. Pour pouvoir être combinés et affectés au traitement des signaux, les composants optiques discrets doivent être établis sur une table de laboratoire exempte de vibrations. Une telle méthode étant inutilisable pour des applications industrielles, on a introduit, à la fin des années soixante déjà, l'intégration de structures optiques qui, à l'image de l'intégration de circuits électroniques, permet de combiner plusieurs éléments miniaturisés sur un substrat (puce). L'on a élaboré des solutions visant à intégrer des éléments aussi divers que les guides optiques, miroirs, lentilles, prismes, coupleurs à réseau, polariseurs, modulateurs et lasers [1].

Les circuits optiques intégrés *(OIC, O*ptical *I*ntegrated *C*ircuit) offrent une série d'avantages par rapport aux systèmes optiques traditionnels fondés sur des éléments discrets relativement grands. Les principaux avantages sont les suivants:

- largeur de bande considérable
- permettent le multiplexage de longueurs d'ondes
- permettent la fabrication de coupleurs entraînant une perte minime

Trotz weltweiter intensiver Forschungstätigkeit stellten sich Erfolge und Anwendungen bis heute nur sehr zögernd ein. Dies ist in erster Linie der schwierigen Verbindungstechnik im Zusammenhang mit den kleinen Abmessungen, hohen Stabilitätsanforderungen und entsprechend hohen Preisen zuzuschreiben.

2 Materialien

Als Schlüsselelement in jeder optisch integrierten Schaltung dienen Wellenleiter, deren Querschnitte die Grössenordnung der optischen Wellenlänge aufweisen. Solche Wellenleiter wurden schon früh mit drei verschiedenen Materialtypen hergestellt, nämlich Glas, Lithiumniobat ($LiNbO_3$) und III-V-Verbindungshalbleiter* (Galliumarsenid GaAs, Indiumphosphid InP). Jedes Material hat Vor- und Nachteile. So sind Glas-Wellenleiter ziemlich einfach herzustellen, es sind aber nur passive Elemente möglich, und die Abmessungen sind verhältnismässig gross. Die $LiNbO_3$-Technologie ist schon weit fortgeschritten und ermöglicht die Herstellung und Integration von elektrooptischen Schaltern und Modulatoren. Eine grösstmögliche Integration erlaubt hingegen die III-V-Technologie. Mit ihr können Laserquellen, Wellenleiter, Schaltelemente, Detektoren und elektronische Treiberkomponenten (Transistoren) theoretisch auf demselben Chip integriert werden. Sie ist jedoch auch am aufwendigsten, und die Integration mehrerer Komponenten steckt erst in den Anfängen.

21 Glas

Glas ist ein hervorragendes, billiges Material zur Herstellung ebener Schichten, das sich materialtechnologisch stark an die Glasfasertechnik anlehnen kann. Optische Komponenten sind in Glasschichten mit geringsten Verlusten (wenige dB/km) herstellbar. Weiter ist Glas sowohl unter Wärmeanwendung verformbar wie auch unter verschiedenen Umwelteinflüssen stabil. Am wichtigsten ist jedoch die Möglichkeit des Ionenaustausches unter kontrollierbaren Bedingungen zur Beeinflussung des optischen Brechungsindexes. Die Technik des Ionenaustausches in Verbindung mit fotolithographischer Strukturiertechnik lässt eine grosse Komponentenvielfalt zu und eignet sich für eine industrielle Fertigung. Vor allem ermöglicht sie die Herstellung verschiedenartiger Hochleistungswellenleiter.

Beispiele von Komponenten in Glas sind Y-Koppler mit Teilungsverhältnissen von 50:50 bis 1:99, Sternkoppler oder Wellenlängenselektoren. Das Einfügen von Filtern in die Wellenleiter ermöglicht, ausgewählte Wellenlängen durch bestimmte Zweige der Schaltung zu leiten. So wurden von *Corning* Wellenlängenmultiplexer (WDM, *W*avelength *D*ivision *M*ultiplexer) für Wellenlängen von 850 nm und 1300 nm mit Einfügungsverlusten von weniger als 1,5 dB und einer Übersprechdämpfung von über 30 dB hergestellt.

* Verbindungen von Elementen der Gruppen III und V des Periodensystems

- dimensions réduites, poids peu élevé, faible consommation de courant
- peuvent être fabriqués en masse
- haute fiabilité
- insensibles aux vibrations.

En dépit d'une recherche soutenue sur le plan mondial, les succès et les applications à grande échelle se sont fait attendre jusqu'à ce jour. Ce développement hésitant s'explique en premier lieu par les problèmes posés par la connectique en raison des petites dimensions, des exigences étendues en matière de stabilité et des prix élevés qui en résultent.

2 Matériaux

L'élément clé de chaque circuit optique intégré est un guide d'ondes dont la section transversale a la dimension de la longueur d'onde optique. Très tôt déjà, de tels guides optiques ont été fabriqués à l'aide de trois types de matériau, à savoir le verre, le niobiate de lithium ($LiNb_3$) et les composés semi-conducteurs III-V* (arséniure de gallium GaAs, phosphure d'Indium InP). Chacun de ces types de matériau présente des avantages et des inconvénients. C'est ainsi que les guides d'ondes en verre sont relativement faciles à fabriquer mais ils peuvent contenir uniquement des éléments passifs et leurs dimensions sont relativement grandes. La technique $LiNbO_3$, déjà très avancée, permet la fabrication et l'intégration de commutateurs et de modulateurs électro-optiques. Une intégration maximale peut en revanche être réalisée au moyen de la technique III-V. Celle-ci permet théoriquement d'intégrer sur la même puce sources laser, guides optiques, éléments de commutation, détecteurs et éléments d'attaque électroniques (transistors). Toutefois, elle est également la plus coûteuse et le procédé consistant à intégrer plusieurs composants n'a pas encore dépassé le stade de développement initial.

21 Verre

Le verre est un matériau peu coûteux qui se prête idéalement à la fabrication de couches planes dont la technique ressemble fort à celle qui est utilisée pour la confection de fibres optiques. Dans des couches en verre, les composants optiques peuvent être fabriqués avec des pertes minimes (quelques dB/km). En outre, le verre peut à la fois être déformé sous l'effet de la chaleur et rester stable sous différentes influences extérieures. Cependant, il permet surtout l'échange d'ions dans des conditions contrôlables en vue d'influencer l'indice de réfraction optique. Associé à la structuration photolithographique, l'échange d'ions comprend une grande diversité d'éléments et convient à une fabrication industrielle. Il permet avant tout la production de différents guides optiques à hautes performances.

Parmi les exemples de composants en verre, citons les coupleurs Y avec des rapports de couplage de 50:50 à 1:99, les coupleurs en étoile ou les sélecteurs de lon-

* Composés d'éléments des groupes III et V de la classification périodique des éléments

Aufgrund der erwähnten Eigenschaften müsste Glas eigentlich als das Material erster Wahl für die integrierte Optik erscheinen. Es besitzt jedoch eine amorphe Struktur und ist deshalb optisch nicht aktiv, das heisst, der Brechungsindex ist richtungsunabhängig und elektrisch nicht veränderbar. Deshalb eignet es sich im Prinzip nur zur Herstellung rein passiver Elemente wie Wellenleiter, Verteiler oder Koppler. Abstimmbare Elemente können zwar unter Verwendung der Temperaturabhängigkeit des Brechungsindexes ebenfalls verwirklicht werden – beispielsweise *Mach-Zehnder*-Interferometer (siehe Abschnitt 221) als Schalter [2] —, sie sind aber wegen den thermischen Zeitkonstanten nur für langsame Abstimm- oder Schaltvorgänge einsetzbar. Steuerbare Komponenten für die Verwendung in Gigahertzsystemen verlangen dagegen nach andern physikalischen Eigenschaften, wie sie elektrooptische Kristalle (Niobate, Tantalate) aufweisen.

22 Lithiumniobat

Sollen aktive Elemente für Hochfrequenzanwendungen hergestellt werden, so sind dazu optisch aktive Kristalle nötig. Mit Hilfe des elektrooptischen Effekts lässt sich in solchen Kristallen der Brechungsindex und damit die Phase des Lichts beeinflussen. Dies ermöglicht den Bau verschiedener interessanter Elemente, deren Funktion auf Interferenzeffekten beruht. Da aber die optische Aktivität aufgrund der Anwesenheit verschiebbarer Ladungen zustande kommt, muss in diesen Materialien eine gegenüber Glas erhöhte Absorption (typisch einige dB/m) in Kauf genommen werden.

Von den in Frage kommenden Materialien hat sich seit vielen Jahren besonders Lithiumniobat ($LiNbO_3$), ein einachsiger Kristall mit hoher Doppelbrechung, bewährt (Doppelbrechung bedeutet verschiedene Brechungsindizes in verschiedenen Richtungen; der *o*rdentliche Brechungsindex beträgt für eine Wellenlänge von 1300 nm $n_o = 2{,}221$ und der *a*usserordentliche $n_a = 2{,}145$). Der Kristall bietet eine Kombination von guter Transmission über einen grossen Wellenlängenbereich mit hohen elektrooptischen Koeffizienten.

Hergestellt werden die Wellenleiter-Elemente ähnlich wie beim Glas durch Diffusion von Titan mit fotolithographischen Methoden. Auf die eindiffundierten Wellenleiter können dann über einer isolierenden Zwischenschicht aus Quarz metallische Elektroden aufgedampft werden. Beispiele für ausgeführte Elemente auf der Grundlage von Lithiumniobat sind:

- elektrooptische Polarisations-Kontroller
- Frequenz-Schieber
- abstimmbare Wellenlängenfilter
- Polarisations-Multiplexer und -Demultiplexer
- abstimmbare, wellenlängenselektive Koppler
- Mach-Zehnder-Modulatoren
- $\Delta\beta$-Richtkoppler.

Die zwei letzten können als Grundbausteine betrachtet werden.

gueur d'onde. En insérant des filtres dans les guides optiques, on peut acheminer des ondes de longueurs quelconques à travers certaines branches du circuit. Ainsi, *Corning* a développé des multiplexeurs (WDM, *W*avelength *D*ivision *M*ultiplexer) pour des longueurs d'ondes de 850 nm et 1300 nm avec de pertes d'insertion inférieures à 1,5 dB et un affaiblissement diaphonique supérieur à 30 dB.

Compte tenu des propriétés mentionnées, le verre devrait au fond être considéré comme le matériau de premier choix pour l'optique intégrée. Le fait est qu'il présente une structure amorphe, n'étant ainsi pas actif du point de vue optique. En d'autres termes, l'indice de réfraction est indépendant de la direction et n'est pas modifiable par un procédé électrique. Par conséquent, il ne se prête en principe qu'à la fabrication d'éléments purement passifs tels que les guides d'ondes, répartiteurs et coupleurs. S'il est vrai qu'on peut créer des éléments accordables en mettant à profit la variabilité de l'indice de réfraction selon la température – tels que l'interféromètre de *Mach-Zehnder* (chapitre 22) en tant que commutateur [2] —, on ne peut toutefois les utiliser que pour des processus d'accord ou de commutation lents à cause des constantes de temps thermiques. Quant aux composants contrôlables et utilisables dans des systèmes fonctionnant dans le domaine du gigahertz, ils exigent d'autres particularités physiques telles qu'on les trouve dans les cristaux électro-optiques (niobates, tantalates).

22 Niobate de lithium

La création d'éléments actifs pour des applications haute fréquence exige des cristaux actifs du point de vue optique. A la faveur de l'effet électro-optique, on peut agir sur l'indice de réfraction de tels cristaux et, partant, sur la phase de la lumière. On peut ainsi construire différents éléments importants dont la fonction repose sur des effets d'interférence. L'activité optique résultant cependant de la présence de charges décalables, ces matériaux se distingueront par un pouvoir d'absorption accru par rapport au verre (valeur typique quelques dB/m).

Parmi les matériaux entrant en ligne de compte, le niobiate de lithium ($LiNbO_3$), un cristal uniaxe doté d'une biréfringence élevée, s'est révélé particulièrement efficace depuis de nombreuses années (biréfringence signifie qu'il y a différents indices de réfraction dans différentes directions; pour une longueur d'onde de 1300 nm, l'indice de réfraction ordinaire (n_o) est de 2,221 et l'indice extraordinaire (n_a) de 2,145). Le cristal allie une bonne qualité de transmission sur une large gamme d'ondes à des coefficients électro-optiques élevés.

A l'instar du verre, les éléments de guides optiques sont fabriqués par diffusion de titane selon des procédés photolithographiques. Les guides d'ondes ainsi obtenus sont ensuite recouverts d'une couche isolante en quartz sur laquelle on peut métalliser des électrodes sous vide. Les éléments fabriqués sur la base de niobiate de lithium peuvent revêtir les formes suivantes:

- contrôleur de polarisation électro-optique
- décaleur de fréquence

221 Funktionsweise integriert-optischer Lithiumniobat-Elemente

In *Figur 1* sind zwei Typen von interferometrischen *Mach-Zehnder-Modulatoren* dargestellt [3]. Der bekannteste Modulator ist das *Y-Interferometer* (Fig. 1a). Das eintretende Licht wird in einer symmetrischen Y-Verzweigung gleichmässig auf zwei Wellenleiterarme verteilt. Es weist am Verzweigungspunkt keine Phasendifferenz auf. Wenn beide Arme optisch gleich lang sind, kommen die zwei Teilstrahlen am zweiten «Y» in Phase an und überlagern sich aufbauend im Ausgangs-Wellenleiter (konstruktive Interferenz). Bis auf geringe Verluste ist damit die Ausgangsintensität gleich der eingehenden. Das Anlegen einer elektrischen Spannung an die Elektroden erlaubt über den elektrooptischen Effekt den Brechungsindex und damit die Phase in den Wellenleitern zu beeinflussen. Wird dadurch zwischen den Teilstrahlen eine Phasendifferenz von genau π erzeugt, so hat der aus ihrer Überlagerung entstehende Strahl eine antisymmetrische laterale Amplitudenverteilung. Dies entspricht der Form nach einem Modus zweiter Ordnung, der sich im Einmoden-Ausgangswellenleiter nicht fortpflanzen kann. Das Licht wird dadurch gezwungen, sich ins Substrat auszubreiten, und geht verloren. Andere Werte der angelegten Spannung liefern jeden beliebigen Zwischenwert der optischen Ausgangsintensität.

Das gleiche interferometrische Prinzip kann verwendet werden, um einen optischen Kreuzungsschalter herzustellen, wenn die beiden Y-Verzweigungen durch 3-dB-Koppler ersetzt werden. Man erhält dadurch das in Fi-

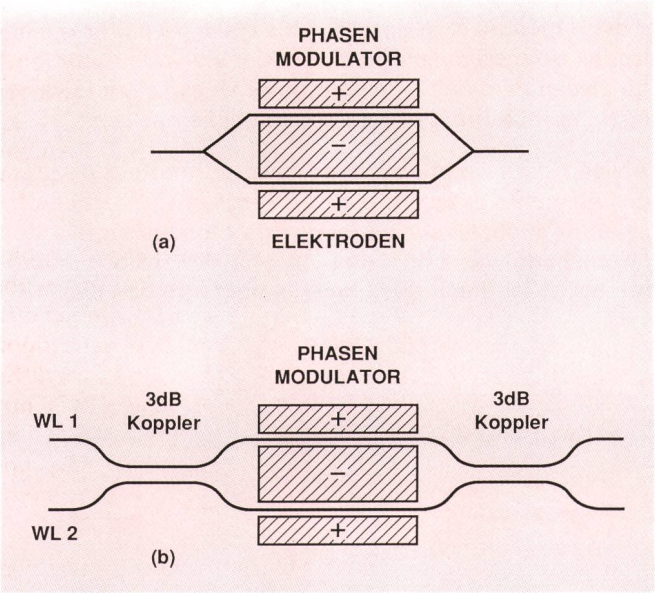

Fig. 1 Prinzip eines Mach-Zehnder-Interferometers (MZI) – Principe d'un interféromètre Mach-Zehnder (MZI)

a) Y-Interferometer – Interféromètre Y
b) 4-Pol-Interferometer – Interféromètre quadripole
WL Wellenleiter – Guide optique
Phasenmodulator – Modulateur de phase
Elektroden – Electrodes
3-dB-Koppler – Coupleur 3 dB

- sélecteur de longueurs d'onde
- multiplexeur et démultiplexeur de polarisation
- coupleur sélectif en longueurs d'ondes
- modulateur Mach-Zehnder
- coupleur directif $\Delta\beta$.

Les deux derniers exemples peuvent être considérés comme des composants de base.

221 Fonctionnement des éléments optiques intégrés en niobiate de lithium

La *figure 1* montre deux types de *modulateurs Mach-Zehnder* interférométriques [3]. Le modulateur le plus connu est l'*interféromètre Y* (fig. 1a). La lumière entrante est répartie uniformément sur deux bras du guide d'ondes au moyen d'une dérivation symétrique en Y. Elle ne présente aucun déphasage au point de dérivation. Lorsque les deux bras ont la même longueur optique, les deux rayons partiels arrivent en phase au second «Y» et se superposent en se combinant dans le guide d'optique de sortie (interférence constructive). Si l'on excepte des pertes minimes, l'intensité de sortie est égale à l'intensité d'entrée. En appliquant une tension électrique aux électrodes, on peut influencer l'indice de réfraction et donc la phase dans les guides d'ondes grâce à l'effet électro-optique. Si l'on produit ainsi entre les rayons partiels un déphasage correspondant exactement à π, le rayon découlant de leur superposition se caractérise par une répartition d'amplitude latérale et antisymétrique. Du point de vue de la forme, cela correspond à un mode de deuxième ordre qui ne peut pas se propager dans le guide d'ondes de sortie monomode. La lumière est ainsi obligée de se propager dans le substrat, ce qui en provoque la perte. D'autres valeurs de la tension appliquée fournissent une valeur intermédiaire quelconque de l'intensité de sortie optique.

Le même principe interférométrique peut s'appliquer à la fabrication de matrices de commutation optiques lorsque les deux dérivations en Y sont remplacées par des coupleurs 3 dB. Il en résulte l'*interféromètre quadripole Mach-Zehnder* reproduit dans la figure 1b. Chaque coupleur est constitué par deux guides d'ondes parallèles. L'écart qui les sépare le long d'un tronçon L est tellement faible que l'énergie optique peut transiter entre eux dans un sens ou dans l'autre. Or, si L était égal à la *longueur de couplage* L_c, la lumière de l'un des guides d'ondes passerait entièrement dans l'autre. La longueur d'un coupleur 3 dB n'atteint toutefois que $L_c/2$. Le processus de couplage est donc interrompu à mi-chemin, de sorte qu'après le premier coupleur la lumière introduite, par exemple, dans le guide d'ondes d'entrée supérieur se trouve à 50 % dans le bras supérieur et à 50 % dans le bras inférieur. Sans tension aux électrodes, les deux rayons partiels parviennent avec un déphasage inchangé au second coupleur où le processus de couplage s'achève: Toute la lumière est ainsi concentrée à la sortie du guide inférieur (état de commutation croisé). En revanche, une tension appliquée qui engendre juste-

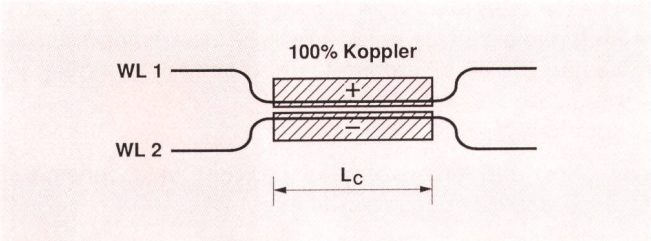

Fig. 2 Prinzip eines Δβ-Richtkopplers – Principe d'un coupleur Δβ directif
WL Wellenleiter – Guide optique
L_c Kopplungslänge – Longueur de couplage
100%-Koppler – Coupleur 100 %

gur 1b gezeigte *4-Pol-Mach-Zehnder-Interferometer.* Jeder Koppler wird von zwei parallelen Wellenleitern gebildet, deren Abstand entlang einer Strecke L so gering ist, dass die Lichtenergie zwischen ihnen hin- und herfliessen kann. Wäre nun L gleich der *Kopplungslänge L_c,* so würde Licht vom einen Wellenleiter gerade vollständig in den andern übergehen. Die Länge eines 3-dB-Kopplers beträgt aber nur $L_c/2$. Der Kopplungsprozess wird also in der Hälfte unterbrochen, so, dass sich nach dem ersten Koppler je 50 % des Lichtes, das zum Beispiel in den oberen Eingangswellenleiter eingeführt worden sei, im oberen und unteren Arm befinden. Ohne Spannung an den Elektroden gelangen die beiden Teilstrahlen mit unveränderter Phasendifferenz zum zweiten Koppler, wo der Kopplungsprozess zu Ende geführt wird: Alles Licht befindet sich damit beim Ausgang im unteren Leiter (gekreuzter Schaltzustand). Eine angelegte Spannung dagegen, die gerade eine zusätzliche Phasendifferenz zwischen den beiden Teilstrahlen von π entstehen lässt, bewirkt, dass der Kopplungsprozess im zweiten Koppler rückgängig gemacht wird und das Licht aus dem oberen Wellenleiter austritt (paralleler Schaltzustand).

Durch Einbauen des Abschnittes mit einstellbarer Phase in die Koppelstrecke erhält man den in *Figur 2* dargestellten, schaltbaren *Δβ*-Richtkoppler. Auch dieser kann in seiner Grundform als Modulator oder als Kreuzungsschalter verwendet werden. In anderen Varianten wurde er auch als Wellenlängen- oder Polarisationsfilter eingesetzt. Die Kopplerlänge beträgt L_c, so dass Licht vom einen Wellenleiter beim Durchgang vollständig in den andern überführt wird. Das Anlegen einer geeigneten Spannung gestattet die relative Phase der Wellenleiter so zu ändern, dass sich am Ende der Kopplungsstrecke alles Licht wieder im Eingangswellenleiter befindet. Diese Konstruktion verlangt jedoch sehr enge Herstellungstoleranzen betreffend Länge der Koppelstrecke und Abstand beider Wellenleiter, damit die beiden Schaltzustände rein vorliegen.

Wesentlich flexibler ist der in *Figur 3* gezeigte *aufgeteilte* Δβ-Koppler (split-Δβ-coupler). In der idealen Konfiguration beträgt L genau $\sqrt{2}\cdot L_c$. Wird nun an beiden Elektrodenpaaren die gleiche Schaltspannung angelegt *(uniform* Δβ), so ergibt sich der parallele Schaltzustand, während sich durch einfaches Umpolen des einen Elektrodenpaares *(*Δβ reversal) der gekreuzte Schaltzustand erreichen lässt. Technologisch von Interesse ist die Tatment un déphasage supplémentaire entre les deux rayons partiels de π annule le processus de couplage dans le deuxième coupleur et fait que la lumière émerge du guide d'ondes supérieur (état de commutation parallèle).

En incorporant la section à phase réglable dans le trajet de couplage, on obtient le *coupleur directif* Δβ commutable représenté dans la *figure 2.* Fondamentalement, celui-ci peut lui aussi être utilisé comme modulateur ou comme matrice de commutation optique. Dans d'autres variantes, il a aussi revêtu la forme d'un filtre de longueur d'onde ou de polarisation. La longueur du coupleur étant de L_c, la lumière intégrale d'un guide d'ondes passe directement dans l'autre. L'application d'une tension appropriée permet de moduler la phase relative des guides d'ondes de manière que toute la lumière se retrouve dans le guide d'ondes d'entrée à la fin du trajet de couplage. Ce modèle implique cependant des tolérances de fabrication extrêmement précises quant à la longueur du trajet de couplage et à l'espace entre les deux guides optiques, afin que les deux états de commutation soient univoques. .

Le *coupleur* Δβ réparti (split-Δβ-coupler) schématisé dans la *figure 3* peut être utilisé avec une souplesse beaucoup plus grande. Selon la configuration idéale, L est égal exactement à $\sqrt{2}\cdot L_c$. En appliquant la même tension de commutation aux deux paires d'électrodes (Δβ uniforme), on obtient l'état de commutation parallèle, alors qu'il suffit d'inverser la polarité de l'une des paires d'électrodes (Δβ inverse) pour produire l'état de commutation croisé. Sur le plan technique, il importe de souligner que les deux états de commutation peuvent aussi être obtenus pour d'autres valeurs de L par le biais d'une adaptation de la tension aux électrodes, à condition que $L_c \leqq L \leqq 3L_c$ [4]. Il est également possible d'avoir recours à un nombre plus élevé de paires d'électrodes. Afin de maintenir les tensions de commutation à un niveau minimal, L devrait toutefois avoisiner la valeur égale au nombre des sections multiplié par L_c.

Souvent, ces composants de base permettent de créer des éléments exerçant d'autres fonctions. On obtiendra ainsi un multiplexeur de longueurs d'ondes en montant en cascade des coupleurs Δβ aux dimensions appropriées: La longueur de couplage étant fonction de la lon-

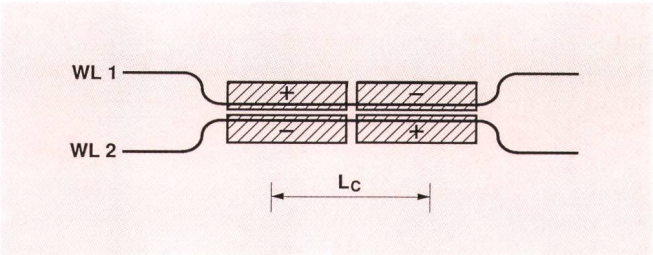

Fig. 3 Prinzip eines aufgeteilten Δβ-Kopplers – Principe d'un coupleur Δβ divisé
WL Wellenleiter – Guide optique
L_c Kopplungslänge – Longueur de couplage
Die eingezeichnete Polarität der angelegten Spannung entspricht dem gekreuzten Schaltzustand – La polarité indiquée de la tension appliquée correspond à l'état de commutation croisé

sache, dass beide Schaltzustände durch Anpassen der Elektrodenspannungen auch für andere Werte von L erhalten werden können, vorausgesetzt es gilt $L_c \leq L \leq 3L_c$ [4]. Es können auch grössere Zahlen von Elektrodenpaaren eingesetzt werden. Um die Schaltspannungen möglichst gering zu halten, sollte L aber ungefähr gleich der Zahl der Abschnitte mal L_c gewählt werden.

Elemente mit anderen Funktionen lassen sich häufig aus diesen Grundkomponenten ableiten. So erhält man einen Wellenlängendemultiplexer durch Kaskadierung geeignet dimensionierter $\Delta\beta$-Koppler: Da die Kopplungslänge wellenlängenabhängig ist, kann sich ein solcher Schalter für eine uns interessierende Wellenlänge im parallelen Zustand und für eine andere gleichzeitig im gekreuzten Zustand befinden und damit die beiden Wellenlängen trennen.

23 III-V-Verbindungshalbleiter

Eine optoelektronische, monolithische Integrationstechnologie auf der Grundlage elektrooptischer, dielektrischer Kristalle wie des Lithiumniobats ist ebensowenig möglich wie unter alleiniger Verwendung von Glas. Beispielsweise enthält bereits ein verhältnismässig einfaches Überlagerungsempfänger-Modul für kohärente Übertragung nebeneinander sowohl passive (Wellenleiter, Koppler), steuerbare (Polarisationskontroller) und aktive Bauteile (Laserdiode, Fotodiode) als auch rein elektronische (Transistoren, Widerstände). Laserdioden, Detektoren und Transistoren können aber nur mit Halbleitermaterialien hergestellt werden.

Der Forderungskatalog umfasst

- die Machbarkeit von Laser- und Fotodiodenstrukturen im gewünschten Wellenlängenbereich
- die Möglichkeit zur Herstellung verlustarmer Wellenleiter
- einen starken elektrooptischen oder anderen Effekt zur Beeinflussung des Brechungsindexes
- die Eignung zur Integration rein elektronischer Elemente.

Für die Herstellung von Lasern muss ein direkter Bandübergang vorliegen, damit eine Rekombination der Ladungsträger über die Bandlücke ohne Impulsübertrag an das Gitter (Phononen) ablaufen kann. Diese Bedingung ist bei Galliumarsenid, Indiumphosphid, Indiumarsenid sowie Mischungen dieser Halbleiter untereinander und mit Aluminium erfüllt, nicht aber bei Silizium oder Germanium. *Figur 4* zeigt die Energiebandlücke E_g verschiedener III-V-Mischhalbleiter über ihrer Gitterkonstanten. Rechts ist zusätzlich die der Bandlücke entsprechende Vakuumlichtwellenlänge λ_g aufgetragen. Eine technologisch wichtige Eigenschaft dieser Materialien ist die in weiten Grenzen mögliche gegenseitige Mischbarkeit. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass die aufgeführten Halbleiter damit den ganzen Bereich der drei Übertragungsfenster optischer Fasern (0,85 µm, 1,3 µm, 1,55 µm) lückenlos abzudecken vermögen. Laser oder Verstärker können aus einem Mischhalbleiter gebaut werden, dessen Bandlücke genau der gewünschten Wellenlänge λ_o des optischen Kanals entspricht, das heisst $\lambda_g = \lambda_0$. Bewegt man sich in Figur 4 durch Verän-

gueur d'onde, un tel commutateur peut être simultanément à l'état parallèle pour une longueur d'onde déterminée et à l'état croisé pour une autre longueur d'onde, séparant ainsi les deux longueurs.

23 Composés semi-conducteurs III-V

Une technique d'intégration monolithique opto-électronique fondée sur des cristaux diélectriques et électro-optiques tels que le niobiate de lithium est aussi peu applicable qu'une telle technique reposant sur la seule utilisation du verre. C'est ainsi qu'un module de réception hétérodyne relativement simple pour la transmission cohérente inclut déjà aussi bien des composants passifs (guide d'ondes, coupleur), réglables (contrôleur de polarisation) et actifs (diode laser, photodiode) que des éléments purement électroniques (transistors, résistances). Or, les diodes laser, détecteurs et transistors ne peuvent être fabriqués qu'avec des matériaux semi-conducteurs.

Les conditions suivantes doivent être réunies:

- faisabilité de structures laser et de photodiodes dans la gamme d'ondes souhaitée
- possibilité de fabriquer des guides d'ondes à faibles pertes
- effet électro-optique puissant ou un autre effet pour influencer l'indice de réfraction
- capacité d'intégrer des éléments purement électroniques.

La fabrication de lasers suppose une transition de bande directe afin qu'une recombinaison des porteurs de charges par-dessus l'écart interbandes puisse se dérouler sans transmission d'impulsions au réseau cristallin (photons). Cette condition est remplie pour l'arséniure de gallium, le phosphure d'indium, l'arséniure d'indium ainsi que pour les mélanges de ces semi-conducteurs entre eux et avec l'aluminium, mais non pas pour le silicium ou le germanium. La *figure 4* montre l'écart inter bandes Eg de différents semi-conducteurs mixtes III-V en fonction de leur constante de réseau. A droite figure 1a longueur d'ondes dans le vide λ correspondant à l'écart interbandes. Une propriété technique importante de ces matériaux et leur importante miscibilité mutuelle. Le graphique révèle que les semi-conducteurs mentionnés sont ainsi capables d'occuper toute la gamme des trois fenêtres de transmission de fibres optiques (0,85 µm, 1,3 µm, 1,55 µm). Le laser ou l'amplificateur peut être construit à partir d'un semi-conducteur mixte dont l'écart interbandes correspond exactement à la longueur d'ondes λ_0 souhaitée du canal optique soit $\lambda_g = \lambda_0$. En prenant des valeurs de λ_g supérieures ($\lambda_g > \lambda_0$) atteints par la modification de la constitution du matériau (bas du tableau), on obtient un matériau à grand pouvoir d'absorption utilisable pour la fabrication de détecteurs. Les matériaux situés dans le haut du tableau ($\lambda_g < \lambda_0$) conviennent en revanche aux guides d'ondes à faible pouvoir d'absorption. Une puce opto-électronique monolithique requiert donc l'épitaxie de plusieurs couches minces monoscristaline de composition différente (hétéroépitaxie). Celle-ci suppose à son tour un

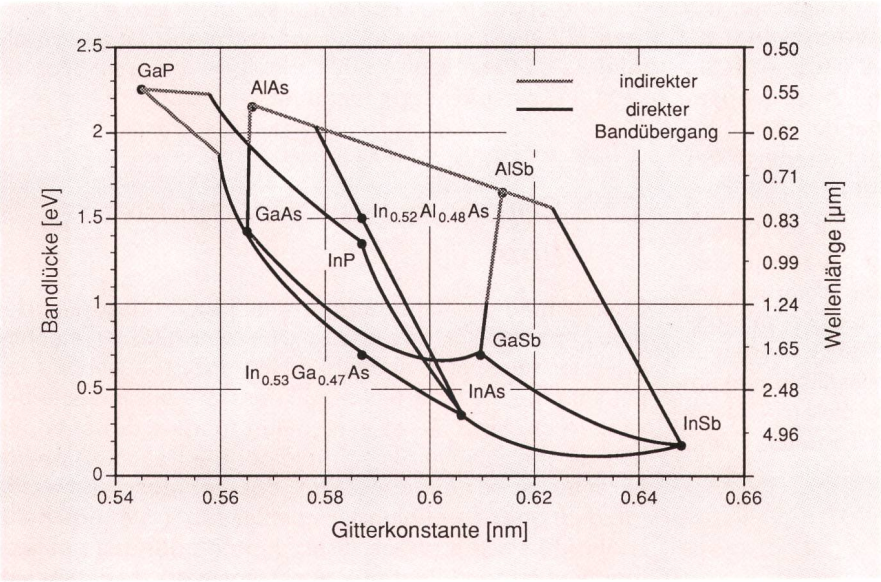

Fig. 4 Bandlücke von III-V-Halbleitern als Funktion der Gitterkonstanten – Ecart inter-bandes de semi-conducteurs III-V en tant que fonction des constantes de réseau

Auf der rechten Ordinate sind die entsprechenden Vakuumwellenlängen eingetragen – L'ordonnée droite porte sur les longueurs d'ondes dans le vide correspondantes
Bandlücke – Ecart inter-bandes
Indirekter/direkter Bandübergang – Passage directe/indirecte d'une bande à l'autre
Gitterkonstante – Constante de réseau
Wellenlänge – Longueur d'onde

dern der Materialzusammensetzung nach unten zu grösseren Werten von λ_g ($\lambda_g > \lambda_o$), so findet man dort bei λ_o absorbierendes Material, das für Detektoren verwendet werden kann. Material aus dem Gebiet oberhalb ($\lambda_g < \lambda_o$) ist dagegen für absorptionsarme Wellenleiter geeignet. Ein monolithischer Optoelektronikchip bedingt also das Aufwachsen mehrerer dünner, einkristalliner Filme unterschiedlicher Zusammensetzung übereinander (Heteroepitaxie). Dies ist nur bei verschwindend kleiner Gitterfehlanpassung der Schichten untereinander und zum Substrat möglich. Wie aus Figur 4 ersichtlich, kann dies mit Materialzusammensetzungen aus drei oder vier Elementen erreicht werden, beispielsweise auf den vertikalen Linien $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ – InP – $In_{0,52}Al_{0,48}As$ oder GaAs-AlAs.

Weiter zeichnen sich Indiumphosphid und Galliumarsenid durch einen linearen elektrooptischen Effekt aus, der zwar kleiner ist als etwa bei Lithiumniobat, aber genügend gross zum Bau von Modulatoren, abstimmbaren Filtern oder Schaltern. Schliesslich lassen sich dank der hohen Mobilität der Ladungsträger (etwa fünfmal höher als im Silizium) auch schnelle elektronische Schaltungen mit diesen Materialien aufbauen.

Aus Figur 4 ist zu entnehmen, dass Aluminium-Galliumarsenid-Legierungen für aktive Bauteile nur bei Wellenlängen um 0,85 µm, also für das erste Lichtfenster, geeignet sind. Aufgrund der dort verhältnismässig hohen Glasfaserdämpfung sind damit aber nur Kommunikationssysteme mittlerer Bitraten über Entfernungen bis etwa 10 km (LAN, *L*ocal *A*rea *N*etworks) möglich. Breitbandsysteme über grosse Distanzen verlangen demgegenüber den Betrieb im zweiten oder dritten Lichtfenster, also bei 1,3 µm oder 1,55 µm. Bei 1,55 µm erreichen heutige Glasfasern Dämpfungswerte kleiner als 0,2 dB/km, beinahe eine Grössenordnung tiefer als bei 0,85 µm. Für diesen Spektralbereich können Indium-Galliumarsenid-Phosphid-Legierungen herangezogen werden. Die technologische Reife dieser Materialien ist aber nicht vergleichbar mit jener von Aluminium-Galliumarsenid, sowohl was die epitaktische Schichtherstellung betrifft, wie auch von der Substratqualität her (Defektfreiheit).

désaccord du réseau infiniment petit entre les diverses couches et par rapport au substrat. Comme le montre la figure 4, on peut y arriver en constituant le matériau de trois ou quatre éléments, par exemple sur les lignes verticales $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ – InP – $In_{0,52}Al_{0,48}As$ ou GaAs-AlAs.

Par ailleurs, le phosphure d'indium et l'arséniure de gallium se caractérisent par un effet électro-optique linéaire qui, s'il est inférieur à celui du niobiate de lithium, est néanmoins assez grand pour permettre la construction de modulateurs, de filtres accordables ou de commutateurs. Finalement, ces matériaux peuvent, en raison de l'importante mobilité des porteurs de charges (environ cinq fois plus grande que celle du silicium), être affectés également à la fabrication de circuits électroniques rapides.

La figure 4 permet aussi de constater que les alliages à base d'aluminium et d'arséniure de gallium conviennent aux composants actifs uniquement pour les longueurs d'ondes d'environ 0,85 µm, autrement dit pour la première fenêtre optique. Vu l'affaiblissement optique relativement important qui distingue celles-ci, on ne pourra toutefois réaliser que des systèmes de communication à débit binaire moyen pour des distances d'environ 10 km au maximum (LAN *L*ocal *A*rea *N*etworks). Des systèmes à large bande destinés à la transmission sur de grandes distances exigent pour leur part des longueurs d'ondes apparaissant dans la deuxième ou troisième fenêtre optique, à savoir de 1,3 µm ou 1,55 µm. Lorsque la longueur d'onde est de 1,55 µm, les fibres optiques actuelles atteignent des valeurs d'affaiblissement inférieures à 0,2 dB/km, ce qui correspond presque à l'ordre de grandeur inférieur par rapport à 0,85 µm. Pour ce domaine spectral, on peut se servir d'alliages de phosphure et d'arséniure d'indium de gallium. La maturité technique de ces matériaux n'est pourtant pas comparable à celle de l'arséniure de gallium et d'aluminium, tant sur le plan de la déposition épitaxiale que sur celui de la qualité du substrat (absence de défauts). Si des transistors à effet de champ rapides à base d'arséniure de gallium ont déjà été introduits, on en est encore au stade expérimental pour le phosphure d'indium.

Beispielsweise sind schnelle Feldeffekttransistoren mit Galliumarsenid heute bereits eingeführt, während man sich bei Indiumphosphid noch im Experimentierstadium befindet.

3 Integrierte Optik in III-V-Halbleitermaterialien

31 III-V-Dünnschichttechnologie

311 Schichtherstellung

In der Dünnschichttechnologie für III-V-Halbleiter beginnen sich gegenüber der herkömmlichen Flüssigphasenepitaxie neue Schichtherstellungsverfahren durchzusetzen: Molekularstrahlenepitaxie *(MBE, M*olecular *B*eam *E*pitaxy) und metall-organische chemische Dampfabscheidung *(MOCVD, M*etal-*O*rganic *C*hemical *V*apour *D*eposition). Beim ersten Verfahren werden die aufzubringenden Materialien thermisch verdampft und im Ultrahochvakuum *(UHV,* etwa 10^{-10} mbar) als äusserst präzise kontrollierbare Molekularstrahlen auf die Substratoberfläche transportiert. Das zweite Verfahren arbeitet dagegen bei höheren Drücken. Die Halbleiterkomponenten und Dotieratome werden als gasförmige metallorganische oder hydrogenierte Verbindungen in die Reaktionskammer eingelassen. Die genaue Kontrolle der Gasflüsse ist dabei verhältnismässig einfach. Das Aufwachsen der gewünschten Schichten geschieht dann durch thermische Zersetzung auf dem beheizten Substrat. Beide Verfahren sind apparativ viel aufwendiger als die Flüssigphasenepitaxie – die Molekularstrahlenepitaxie wegen der Ultrahochvakuumtechnik und die Dampfabscheidung vor allem durch die nötigen Sicherheitsvorkehrungen beim Einsatz der zum Teil hochgiftigen Gase (Arsin, Phosphin) —, sie erlauben aber eine äusserst genaue Kontrolle der Schichtdicke, Grenzflächen und Dotierung und ergeben eine wesentlich bessere Homogenität und Ebenheit. Eine Schichtdickenkontrolle bis hinab zu Einzelatomlagen ist möglich. In derart dünnen Schichten zeigen sich Quanteneffekte, da die Ladungsträger senkrecht zur Schichtebene einen engen *Potentialtopf* vorfinden. Dies führt zu neuartigen, gezielt einstellbaren Materialeigenschaften. Anwendungen solcher Effekte sind beispielsweise der Transistor mit hoher Elektronenbeweglichkeit *HEMT* (*H*igh *E*lectron *M*obility *T*ransistor, ein besonders schneller AlGaAs-Heterostruktur-Transistor) oder die besonders leistungsfähigen *MQW*-Laserdioden (*M*ulti *Q*uantum *W*ell Laser). Das Gebiet der schnellen Elektronik und vor allem die Entwicklung neuer, hochgezüchteter Laserquellen für die Kommunikationstechnik sind denn auch die Hauptgründe für die Entwicklung dieser neuen Beschichtungstechnologien.

312 Trockenätztechnik

Die Herstellung von optisch integrierten Schaltungen in III-V-Heteroschichtsystemen verlangt nach einer genauen, reproduzierbaren Strukturiertechnik mit Submikrometer-Auflösung. Nasschemische Ätzverfahren sind dafür nur noch beschränkt anwendbar. Besonders geeignet sind dagegen Trockenätztechniken. Dabei wird

3 Optique intégrée dans les matériaux semi-conducteurs III-V

31 Technologie des couches minces III-V

311 Fabrication des couches

Dans la technologie des couches minces, la technique traditionnelle, c'est-à-dire l'épitaxie en phase liquide, est de plus en plus supplantée par de nouveaux procédés de fabrication des couches, à savoir: l'épitaxie par faisceau moléculaire *(MBE, M*olecular *B*eam *E*pitaxy) et le dépôt chimique organo-métallique en phase vapeur *(MOCVD, M*etal-*O*rganic *C*hemical *V*apour *D*eposition). Selon la première méthode, les matériaux requis sont soumis à une évaporation thermique avant d'être transportés à la surface du substrat sous ultravide *(UHV,* environ 10^{-10}mbar) en tant que faisceaux moléculaires contrôlables et extrêmement nets. La deuxième méthode s'appuie sur des pressions plus élevées. Les composants semi-conducteurs et les atomes de dopage sont introduits dans la chambre de réaction en tant que composés gazéiformes organo-métalliques ou hydrogénés. Le contrôle précis des flux gazeux est alors relativement simple. Le dépôt des couches souhaitées en phase vapeur a ensuite lieu par décomposition thermique sur le substrat chauffé. Les deux techniques exigent des installations beaucoup plus complexes que celles qui sont utilisées pour l'épitaxie en phase liquide – l'épitaxie par faisceau moléculaire en raison du procédé UHV et le dépôt en phase vapeur surtout du fait des mesures de sécurité imposées par l'utilisation de gaz en partie hautement toxiques (arsine, phosphine). Elles permettent néanmoins un contrôle très rigoureux de l'épaisseur des couches, des surfaces de limite et du dopage, garantissant ainsi une homogénéité et une planéité largement supérieures. Le contrôle de l'épaisseur des couches peut également porter sur des monocouches. Des couches aussi minces font apparaître des effets quantiques, étant donné que les porteurs de charges trouvent un *puits de potentiel* étroit placé perpendiculairement à la surface des couches. Il en résulte des particularités nouvelles et modulables. De tels effets se retrouvent par exemple dans le transistor à forte mobilité électronique *(HEMT, H*igh *E*lectron *M*obility *T*ransistor, un transistor particulièrement rapide à l'hétérostructure AlGaAs) ou dans les diodes laser *MQW* (*M*ulti *Q*uantum *W*ell Laser), particulièrement puissantes. L'électronique rapide et avant tout le développement de nouvelles sources laser sophistiquées pour la transmission sont ainsi à la base de la mise au point de ces techniques d'enrobage inédites.

312 Technique d'attaque de surface à sec

La fabrication de circuits optiques intégrés dans les systèmes à hétérocouches III-V requiert une technique de structuration précise et reproductible avec résolution submicronique. Des procédés d'attaque en solution ne peuvent plus être appliqués qu'avec restriction. En

die zu ätzende Probe in einer Vakuumkammer bei einem Druck von $10^{-3}...10^{-1}$ mbar den Ionen und angeregten, reaktiven Neutralteilchen eines Hochfrequenzplasmas ausgesetzt. Die chemische Reaktion dieser Teilchen mit der exponierten Oberflächenschicht der Probe lässt flüchtige Reaktionsprodukte entstehen, die nach ihrer Desorption die darunterliegenden Schichten freilegen. Dieser Prozess trägt demnach die Probenoberfläche schichtweise ab. Eine besondere Reaktorkonstruktion verursacht zudem, dass sich die Probe gegenüber dem Plasmapotential um einige 100 V negativ auflädt und deshalb durch die positiven Ionen aus dem Plasma beschossen wird. Dies führt zu stark erhöhten Ätzraten (Faktor 10...100) jener Flächen, die senkrecht zum Ionenbeschuss stehen. Dieser Prozess ermöglicht eine formtreue Musterübertragung der Ätzmaske in die Probenoberfläche bis zu hohen Tiefen-Breiten-Verhältnissen. In der Praxis ist der erzielte Grad der Ätzgenauigkeit allerdings noch von den experimentellen Parametern (Gaszusammensetzung, Plasmaparameter, Ätzmaske) und der genauen, im allgemeinen komplexen Reaktionskinetik abhängig.

32 Aktive optoelektronische Halbleiterkomponenten

321 Diodenlaserquellen

Die Entwicklung von integrierbaren Laserdioden für die optische Kommunikation geht in zwei Hauptrichtungen: ultraschnelle, direktmodulierbare Dioden für inkohärente Übertragung und schmalbandige, abstimmbare Senderquellen, die für kohärente Übertragungssysteme geeignet sind.

Heutige optische Kommunikationssysteme arbeiten noch vorwiegend mit inkohärenter, amplitudenmodulierter Übertragung. Hier ist die Anforderung an die Linienbreite der Laserquelle mit typisch 100 GHz gering. Gefordert ist dagegen eine hohe Modulationsbandbreite. Spezialisierte Halbleiterlasertypen für diese Anwendung erreichen bereits Modulationsgrenzfrequenzen über 20 GHz [5]. Die *kohärente Übertragungsart* wird jedoch aufgrund ihrer höheren Detektorempfindlichkeit von 5 bis 20 dB (entsprechend etwa 50 km Faserstrecke) und ungleich besserer Ausnützung der Kanalkapazität optischer Fasern (mehrere Grössenordnungen) in künftigen Systemen wesentlich an Bedeutung gewinnen [6]. Diese Technik stellt aber enorme Anforderungen an die Linienbreite ($\Delta\nu \approx 1$ MHz) und – aufgrund des Überlagerungsempfangsprinzips – an die Frequenzstabilität sowohl des Sende- wie auch des Lokaloszillatorlasers. Zudem wäre eine möglichst breitbandige Abstimmbarkeit erwünscht, um das ganze verwendete Lichtfenster ausnützen zu können (im dritten Lichtfenster mit einer Bandbreite von etwa 20 THz können zum Beispiel bis zu tausend Kanäle mit Abständen im Gigahertzbereich angesiedelt werden). Ein Lösungsansatz besteht in der Integration einer geeigneten Laserdiode mit einem externen Modulator. Damit können Stabilitätsprobleme und Linienverbreiterungen im Zusammenhang mit der Direktmodulation vermieden werden. Bei der Entwicklung von Halbleiterlasern mit den gewünschten Eigenschaften kristallisierten

revanche, les techniques d'attaque de surface à sec conviennent particulièrement. D'après ces dernières, le prélèvement est exposé dans une chambre à vide soumise à une pression de $10^{-3}...10^{-1}$ mbar aux ions et aux particules neutres réactives et excitées d'un plasma haute fréquence. La réaction chimique de ces particules avec la couche superficielle exposée du prélèvement engendre des produits volatiles qui, après leur désorption, dégagent les couches inférieures. Ce processus entraîne ainsi une dénudation de la surface du prélèvement par couches successives. Une construction spéciale du réacteur fait que le prélèvement se charge négativement de quelques centaines de V par rapport au potentiel du plasma, subissant ainsi un bombardement par des ions positifs du plasma. Il en résulte une forte augmentation de la vitesse d'attaque (10...100) sur les surfaces qui sont perpendiculaires à la trajectoire du bombardement ionique. Ce processus permet une copie fidèle du masque dans la surface du prélèvement jusqu'à des rapports profondeur/largeur importants. Dans la pratique cependant, la précision d'attaque atteinte dépend encore des paramètres expérimentaux (composition du gaz, paramètres du plasma, masque d'attaque) et de la théorie cinétique des réactions généralement complexe.

32 Composants semi-conducteurs opto-électroniques actifs

321 Diodes laser

Le développement de diodes laser pouvant être intégrés dans les systèmes de transmission optiques se déroulent dans deux directions principales: celle des diodes ultrarapides directement modulables pour les systèmes incohérents et celle des sources d'émission accordables à bande étroite pour les systèmes cohérents.

Les systèmes de communication optiques d'aujourd'hui sont encore fondés pour la plupart sur la transmission incohérente à modulation en amplitude. La largeur de raie exigée pour la source laser y est faible (valeur typique 100 GHz). La largeur de bande de modulation doit en revanche être importante. Des types de lasers semiconducteurs spécialement conçus pour cette application atteignent déjà des fréquences limites de modulation de plus de 20 GHz [5]. Le *genre de transmission cohérent* gagnera cependant en importance dans les systèmes de demain [6] en raison d'une sensibilité accrue du détecteur de 5 à 20 dB (correspond à une liaision optique d'environ 50 km) et d'une bien meilleure utilisation du nombre de canaux transmissibles par fibres optiques (plusieurs ordres de grandeur). Cette technique est toutefois très exigeante quant à la largeur de raie ($\Delta\nu \approx 1$ MHz) et – conformément au principe de la réception hétérodyne – à la stabilité des fréquences du laser d'émission ainsi que de l'oscillateur-laser local. En outre, une capacité d'accord à large bande serait souhaitable pour garantir l'exploitation de toute la fenêtre optique requise (la troisième fenêtre optique, dont la largeur de bande est d'environ 20 THz, peut, par exemple, contenir jusqu'à mille canaux espacés dans la gamme des gigahertz). Une possibilité consiste à intégrer une diode laser adéquate équipée d'un modulateur externe. On peut ainsi éviter des problèmes de stabilité

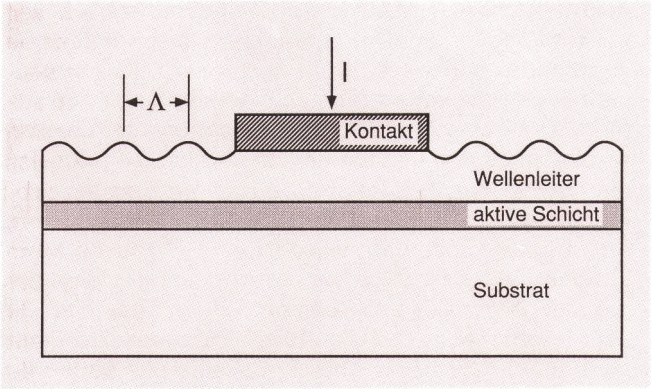

Fig. 5 Schematischer Querschnitt entlang des Resonators eines «Distributed Bragg Reflector»-Lasers (DBR-Lasers) – Coupe schématique longitudinale du résonateur d'un laser DBR («Distributed Bragg Reflector»)

Λ ist die Gitterperiodizität des Braggschen Reflektors – Λ est la période de réseau du réflecteur de Bragg
Kontakt – Contact
Wellenleiter – Guide optique
Aktive Schicht – Couche active
Substrat – Substrat

sich in den letzten Jahren einige vielversprechende neue Konzepte heraus, die aus heutiger Sicht von einiger Bedeutung sein werden:

- *Figur 5* zeigt den schematischen Querschnitt eines *DBR-Lasers* (*D*istributed *B*ragg *R*eflector Laser). Die Gitterstruktur auf der Wellenleiterschicht bewirkt, dass die bei normalen Laserdioden auftretende *Fabry-Perot-Modenstruktur* auf einen einzelnen longitudinalen Modus zurückgeführt wird, entsprechend der Bragg'schen Reflexionsbedingung bei der verwendeten Gitterperiodizität Λ. Damit lassen sich einmodige Laserdioden mit Linienbreiten von typisch 10 MHz herstellen. Solche sind auch bereits kommerziell erhältlich. Als Nachteile müssen die hohe Empfindlichkeit gegenüber Reflexionen, die zu Linienverbreiterungen führen, sowie die starke Temperaturabhängigkeit der Laserfrequenz (etwa 10 GHz/°C) in Kauf genommen werden.

- In *Figur 6* ist ein *DBR-Laser* mit *drei Sektionen* für 1,55 µm schematisch dargestellt. Die aktive Schicht aus Indium-Galliumarsenid-Phosphid erstreckt sich nur über das erste Drittel des Resonators. Dieser ist als direkt angrenzende Wellenleiterschicht (wie im oberen Beispiel, aber hier *unter* der aktiven Schicht) aus transparentem Material (InGaAsP mit grösserem Bandabstand) aufgebaut. Im letzten Drittel des Resonators wird diese Schicht zusätzlich mit einer Bragg-Gitterstruktur versehen. Die drei Sektionen erhalten je eine Kontaktfläche. Die erste dient dem Laserbetrieb mit dem injizierten Strom I_{Laser}. Mit I_{Tune} kann über den Materialbrechungsindex die Gitterkonstante der Bragg-Struktur und damit die Wellenlänge gewählt werden. Über die mittlere Elektrode wird mit I_{Phase} die Resonatorlänge so angepasst, dass die optische Phasenlage zu einer stehenden Welle führt. Damit erhält man also einen einmodigen, *abstimmbaren* Laser. Es

et des élargissements de raie à propos de la modulation directe. Au cours des dernières années, le développement de lasers semi-conducteurs répondant aux critères souhaités a débouché sur quelques nouveaux systèmes prometteurs qui revêtiront une certaine importance dans l'optique actuelle:

- La *figure 5* schématise la coupe transversale d'un *laser DBR* (*D*istributed *B*ragg *R*eflector Laser). Du fait de la structure réticulaire de la couche du guide d'ondes, la *structure modale de type Fabry-Perot,* qui caractérise les diodes laser normales, est ramenée à un seul mode longitudinal selon la condition de la réflexion de Bragg concernant la période retenue du réseau Λ. On peut ainsi construire des diodes laser monomode avec des largeurs de raie de 10 MHz (valeur typique). De tels produits sont déjà disponibles sur le marché. Parmi les inconvénients de telles diodes, il convient de citer la haute sensibilité aux réflexions qui amènent des élargissements de la raie, ainsi que la forte dépendance en température de la fréquence laser (environ 10 GHz/°C).

- La *figure 6* montre un *laser DBR* à trois sections pour 1,55 µm. La couche active InGaAsP ne couvre que le premier tiers du résonateur qui, en tant que couche adjacente du guide optique (comme dans l'exemple

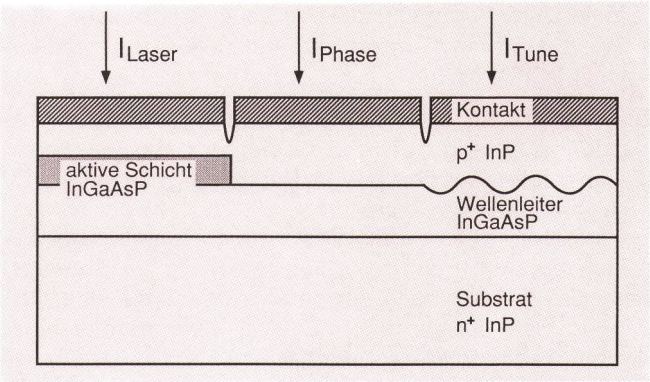

Fig. 6 Schematischer Querschnitt entlang des Resonators eines abstimmbaren 3-Sektionen-DBR-Lasers – Coupe schématique longitudinale du résonateur d'un laser DBR accordable à trois sections

Die aktive Schicht besteht aus InGaAsP mit einer Bandlücke entsprechend einer Emissionswellenlänge von 1,55 µm, während die Wellenleiterschicht aus diesem Material, aber mit grösserem Bandabstand für Wellenlängen oberhalb 1,3 µm transparent ist – La couche active se compose de InGaAsP avec un écart inter-bandes correspondant à une longueur d'onde d'émission de 1,55 µm, alors que la couche du guide optique composée de ce matériau, mais avec un écart inter-bandes plus grand est transparente pour des longueurs d'ondes supérieures à 1,3 µm

InGaAsP	Indium-Galliumarsenid-Phosphid – Phosphure et arséniure d'indium et de gallium
InP	Indiumphosphid – Phosphure d'indium
I_{Laser}	Laserstrom – Courant laser
I_{Phase}	Strom zur Einstellung der Phase – Courant pour l'ajustement de phase
I_{Tune}	Abstimmstrom – Courant d'accord
p^+	p^+-Dotierung – Dopage p^+
n^+	n^+-Dotierung – Dopage n^+

Aktive Schicht – Couche active
Kontakt – Contact
Wellenleiter – Guide optique
Substrat – Substrat

wurden Abstimmbereiche bis in den THz-Bereich bei Linienbreiten von typisch 15...50 MHz erreicht. Herausragend ist das Beispiel eines kontinuierlichen, sprunglosen Abstimmbereichs von 2 nm – entsprechend 250 GHz – bei einer Linienbreite kleiner als 1 MHz [7].

- Weitere Verbesserungen der Linienbreite können mit der Multi-Quantum-Well-Laserstruktur erreicht werden, die erst dank den neuen Beschichtungsverfahren möglich ist. Die aktive Schicht besteht hier aus einem Paket abwechselnder Filme zweier unterschiedlicher gitterangepasster Materialzusammensetzungen (z. B. GaAs/AlGaAs oder InGaAs/InGaAsP). Da beide Materialien eine unterschiedliche Energielücke aufweisen, verlaufen die Bandkanten senkrecht zur Schicht rechteckförmig auf und ab. Damit entstehen periodische Potentialtöpfe für die Ladungsträger. Wenn die einzelnen Filme sehr dünn sind (etwa 10 nm), bilden sich in diesen Potentialtöpfen diskrete Energieniveaus aus (Quanteneffekt). Die Anregung und Rekombination von Ladungsträgern über die Bandlücke läuft dann zwischen solchen Niveaus ab, was zu schmaleren Emissionslinien, höheren Verstärkungsfaktoren und damit auch zu kleinerem Rauschen führt. Überdies nimmt damit auch der Temperaturgang der Emissionswellenlänge ab. Aktive derartige Schichten lassen sich natürlich auch in eine Laserstruktur gemäss Figur 6 einbauen [8]. Dieser Laser erreicht eine minimale Linienbreite von 200 kHz bei einer optischen Leistung von 17 mW. Der differentielle Wirkungsgrad beträgt 0,28 mW/mA.

Eine weitere für die integrierte Optik interessante Entwicklungsrichtung auf dem Gebiet der Halbleiterlaser, die ebenfalls von den neuen Herstellungsverfahren für Vielschichtstrukturen profitiert, bilden die *oberflächenemittierenden Laser mit vertikalem Resonator.* Die Laserschwingung ergibt sich hier senkrecht zur Substratebene. Das Licht wird normalerweise durch eine Öffnung im Substrat ausgekoppelt. Das Besondere an einer solchen Laserstruktur ist die geringe Länge L des Resonators von typisch 4 μm, was einen grossen Modenabstand $\Delta\nu$ von etwa 70 THz ($\Delta\nu = c/2L$, c = Lichtgeschwindigkeit) und damit einen unkritischen Einmodenbetrieb ermöglicht. Anderseits sind die optischen Gesamtverluste wegen der kurzen aktiven Zone wesentlich durch die Spiegel bestimmt, so dass deren Qualität (Reflexionsvermögen, Ebenheit und Parallelität) eine hohe Bedeutung zukommt. Die Spiegel werden entweder als dielektrisches Mehrschichtsystem oder in der Form eines Mehrschicht-Bragg-Reflektors aus gitterangepassten Halbleiterschichten ausgeführt. Die zweite Lösung erscheint als technologisch besonders vielversprechend, da sie mit dem Dampfabscheidungs-Prozess zur Herstellung der übrigen Laserstruktur kompatibel ist. Dieser erlaubt es auch, die hohen Anforderungen an die Qualität der Spiegelschichten zu erfüllen und damit die Schlüsselparameter Schwellstromdichte, Wirkungsgrad und Linienbreite günstig zu beeinflussen [9].

Obschon oberflächenemittierende Laser bereits 1979 erschienen [10], wurde deren Potential für die moderne Kommunikationstechnik erst in den letzten Jahren richtig erkannt. Attraktiv ist vor allem die elegante Kopplungsmöglichkeit an optische Einmodenfasern, indem

décrit ci-dessus, mais *sous* la couche active), est constitué de matériel transparent (InGaAsP avec écart interbandes supérieur). Dans le dernier tiers du résonateur, cette couche est en plus dotée d'une structure réticulaire selon Bragg. Les trois sections sont recouvertes chacune d'une surface de contact. La première est utilisée par le laser avec le courant injecté I_{Laser}. I_{Tune} permet de déterminer, à l'aide de l'indice de réfraction du matériau, la constante de réseau de la structure de Bragg et par conséquent la longueur d'onde. Avec I_{Phase}, la longueur du résonateur est adaptée au moyen de l'électrode intermédiaire de manière que la phase optique aboutisse à une onde stationnaire. De la sorte, on obtient donc un laser monomode *accordable.* On a atteint des gammes d'accord maximales dans le domaine des THz avec des largueurs de raie de 50...50 MHz (valeur typique). L'exemple le plus significatif est un domaine d'ajustage continu de 2 nm – correspondant à 250 GHz – pour une largeur de raie inférieure à 1 MHz [7].

- D'autres améliorations de la largeur de raie peuvent être réalisées avec la structure de laser MQW, qui ne peut être créée qu'à la faveur des nouvelles techniques d'enrobage. L'élément actif se compose de couches alternatives de deux assemblages de matériaux différents et adaptés au réseau (p. ex. GaAs/AlGaAs ou InGaAs/InGaAsP). Les deux matériaux présentant un écart interbandes distinct, les limites de bande sont tracées perpendiculairement à la couche et revêtent une forme rectangulaire allant de haut en bas. On obtient ainsi des puits de potentiel périodiques pour les porteurs de charges. Lorsque les différentes couches sont très minces (environ 10 nm), des niveaux d'énergie discrets se développent dans ces puits (effet quantique). Ces niveaux produisent l'excitation et la recombinaison de porteurs de charges pardessus l'écart interbandes, ce qui a pour effet de diminuer les lignes d'émission, de relever les facteurs d'amplification et, partant, de réduire le bruit. De surcroît, la sensibilité à la température de la longueur d'onde d'émission baisse. Naturellement, il est possible d'insérer des couches actives de ce type dans une structure de laser schématisée dans la figure 6 [8]. Ce laser atteint une largeur de raie minimale de 200 kHz pour une puissance optique de 17 mW. L'efficacité différentielle est de 0,28 mW/mA.

Le *laser à émission superficielle avec résonateur vertical* représente une autre direction du développement des lasers semi-conducteurs qui concerne l'optique intégrée et qui tire également profit des nouveaux procédés de fabrication pour les structures multicouches multiples. La cavité d'un tel laser est perpendiculaire à la surface du substrat. La lumière est normalement extraite par une ouverture dans le substrat. Une structure de laser de ce genre se particularise par la longueur L minime du résonateur (valeur typique 4 μm), ce qui permet un grand espace modal $\Delta\nu$, d'environ 70 THz ($\Delta\nu = c/2L$, avec c = vitesse de la lumière), et donc un fonctionnemet monomode non critique. Par ailleurs, les pertes optiques globales sont largement déterminées par les miroirs en raison de la brièveté de la zone active, si bien que leur qualité (pouvoir de réflexion, planéité et parallélisme) revêt une grande importance. Les miroirs sont construits soit sous la forme d'un système diélectrique

ein zirkularer Laserresonator mit angepasstem Modendurchmesser problemlos machbar ist. Weiter können auf einfache Art zweidimensionale Anordnungen (Arrays) von oberflächenemittierenden Lasern monolithisch hergestellt werden. Anwendungen sind etwa parallele Multiplex-Fibersysteme oder optische Parallelprozessoren. Nicht zuletzt ist ein herstellungstechnologischer Vorteil zu erwähnen, nämlich die Testbarkeit der Laser auf der Halbleiterscheibe *(on-wafer test)*, d. h. ohne die bei herkömmlichen Laserdioden nötige, aufwendige Trennung und Kontaktierung von Einzeldioden. Veröffentlichte Leistungsdaten oberflächenemittierender Laser mit vertikalem Resonator liegen noch ein gutes Stück hinter jenen der oben diskutierten horizontalen Lasertypen zurück: Schwellstromdichte 1...10 kA/cm^2, differenzieller Quantenwirkungsgrad 10...30 %, Linienbreite 50...100 MHz, cw-Ausgangsleistung 0,5...5 mW [11].

322 Optische Verstärker und Pumpquellen

Nachteilig bei der Verwendung von III-V-Halbleitern für integriert-optische Schaltkreise ist die gegenüber Lithiumniobat nochmals stark erhöhte optische Absorption, die bei diesen Materialien typisch 1 dB/cm beträgt. Dies ist ein prinzipielles Problem, da ein Material, das zur Herstellung von Detektoren und Laserdioden geeignet ist, nicht gleichzeitig absorptionsfrei sein kann. Durch Verändern der Materialzusammensetzung kann zwar die Absorptionskante verschoben werden, die Restabsorption ist aber nicht vernachlässigbar. Eine Lösung bietet die Integration optischer Verstärker, die den verlustbehafteten Komponenten wie Schaltern, Kopplern oder Polarisatoren nachgeschaltet werden; dadurch entstehen verlustfreie Module.

Im Prinzip können Halbleiterlaserdioden als optische Verstärker verwendet werden, wenn dafür gesorgt wird, dass die optische Rückkopplung in die aktive Schicht unterdrückt ist. Sie werden als *optische Halbleiterverstärker SOA* (*S*emiconductor *O*ptical *A*mplifier) bezeichnet und können für alle drei Lichtfenster gebaut werden. Die Unterdrückung der Rückkopplung geschieht am einfachsten durch Entspiegeln der Chip-Endflächen. Mit einer einfachen Viertelwellenschicht eines indexangepassten, dielektrischen Materials können Restspiegelungsfaktoren von 10^{-3}...10^{-4} erreicht werden, dies allerdings nur bei einer festen Wellenlänge. Soll der Verstärker dagegen in wellenlängenmultiplexierten Systemen einsetzbar sein, muss breitbandig entspiegelt werden. Dies erreicht man mit einem Mehrschichtsystem unter Verwendung dielektrischer Materialien mit verschiedenen Brechungsindizes wie SiO_x, TiO_x ($x = 1...2$) oder Al_2O_3. Eine gute Unterdrückung der Reflexion ist aus zwei Gründen wichtig: Erstens führt die Restreflexion zu Fabry-Perot-Moden, die bei den entsprechenden Frequenzen die Inversion im aktiven Medium vermehrt abbauen. Dies hat eine Welligkeit der Verstärkung als Funktion der Wellenlänge (gain ripple) zur Folge. Diese beträgt beispielsweise bei einer mittleren Verstärkung von 25 dB für 10^{-3} Restreflexion 5 dB und für 10^{-4} Restreflexion noch 0,5 dB [12]. Zweitens wurde gezeigt, dass aufgrund der Restreflexion Intermodula-

multicouches ou d'un réflecteur de Bragg à couches multiples de semi-conducteurs adaptées au réseau. La deuxième solution apparaît très prometteuse sur le plan technique, étant compatible avec le procédé de dépôt en phase vapeur appliqué pour la réalisation de la structure de laser restante. En garantissant la qualité élevée exigée pour les couches du miroir, cette technique permet d'influencer favorablement les paramètres clés «densité du courant de seuil», «degré d'efficacité» et «largeur de raie» [9].

Bien que le laser à émission superficielle ait déjà été introduit en 1979 [10], son potentiel pour les systèmes de transmission modernes n'a été véritablement découvert que durant ces dernières années. Un de ses attraits principaux réside dans la possibilité de le coupler de manière élégante à des fibres optiques monomodes, un résonateur laser circulaire avec diamètre de mode approprié étant réalisable sans difficulté. De plus, ce laser permet, par un procédé monolithique simple, de mettre en place des structures (Arrays) bidimensionnelles de lasers à émission superficielle. Les systèmes à fibres optiques multiplexés parallèles ou les processeurs optiques parallèles en constituent deux applications possibles. Il convient de mentionner également un avantage ayant trait au procédé de fabrication, à savoir la possibilité de tester ces lasers sur la *galette semi-conductrice (on-wafer test)*, c'est-à-dire sans la séparation et le bonding de diodes individuelles, un procédé complexe exigé pour les diodes laser usuelles. Les données publiées au sujet de la puissance des lasers à émission superficielle avec résonateur vertical sont encore bien inférieures à celles des types de laser horizontaux précités: densité du courant de seuil 1...10 kA/cm^2, rendement quantique différentiel 10...30 %, largeur de raie 50...100 MHz, puissance de sortie cw 0,5...5 MW [11].

322 Amplificateurs optiques et sources de pompage

Un des inconvénients de l'utilisation de semi-conducteurs III-V pour les circuits optiques intégrés réside dans l'absorption optique fortement accrue par rapport au niobiate de lithium, qui atteint 1 dB/cm pour ces matériaux (valeur typique). Il s'agit là d'un problème fondamental dans la mesure où un matériau qui se prête à la fabrication de détecteurs et de diodes laser ne peut pas en même temps être exempt d'absorption. En modifiant la composition du matériau, on peut certes déplacer l'arête d'absorption sans pour autant supprimer l'absorption résiduelle qui n'est pas négligeable. Ce problème peut être résolu par l'intégration d'amplificateurs optiques qui sont montés en série sur les composants affectés par les pertes tels que commutateurs, coupleurs ou polariseurs; il en résultera des modules exempts de pertes.

En principe, une diode laser semi-conductrice peut servir d'amplificateur optique si la réaction optique est affaiblie dans la couche active. On est alors en présence d'un *amplificateur optique semi-conducteur* SOA (*S*emiconductor *O*ptical *A*mplifier) qui peut être construit pour les trois fenêtres optiques. La manière la plus simple d'atténuer la réaction est de soumettre les surfaces d'extrémité des puces à un traitement antiréflexion. Une

tionsverzerrungen durch Vierwellenmischen auftreten: Schon ein Reflexionskoeffizient von 5×10^{-4} genügt, um bei einer typischen Einwegverstärkung von 25 dB die Verzerrungsleistung zu verdoppeln [13].

Ein weiteres Problem besteht in der polarisationsabhängigen Verstärkung. Diese wurde auch im Zusammenhang mit einem von den PTT-Betrieben unterstützten Forschungsprojekt untersucht [14]. Der Effekt beruht auf den unterschiedlichen Profilen von TE- und TM-Moden in den Rechteckwellenleitern typischer Halbleiterlaserresonatoren. Verstärkungsunterschiede zwischen verschieden polarisiertem Licht bis 7 dB sind normal. Eine Verstärkungsgleichheit zwischen TE- und TM-Polarisation von 1 dB kann aber durch besondere Laseraufbauten, die symmetrischere Modenverhältnisse ergeben, erzwungen werden [15]. Optische Halbleiterverstärker für 1,3 µm und 1,55 µm werden bereits kommerziell angeboten.

Da optische Halbleiterverstärker voll integrierbar sind, finden sie auch in Empfängermodulen als optische Vorverstärker zur Erweiterung der Detektionsempfindlichkeit oder in passiven Verteilnetzen zur Kompensation der inhärenten Signalabschwächung Verwendung. Da eine integriert-optische Schaltung schliesslich durch optische Fasern mit der Aussenwelt verbunden werden muss, kann das Verstärkungsproblem natürlich auch dorthin verlagert werden. In der Tat werden geeignete Glasfasern als optische Verstärker eingesetzt. Solche Faserverstärker bieten gegenüber Halbleiterverstärkern

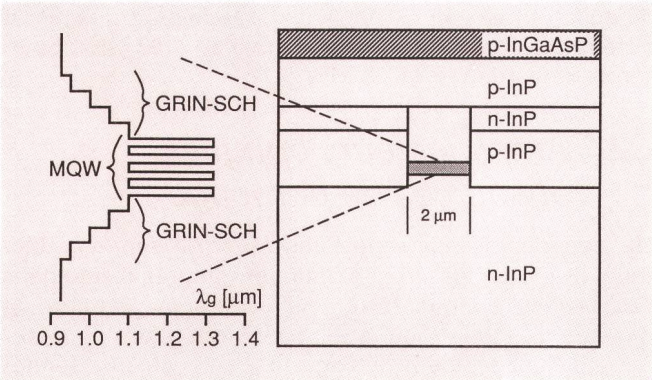

Fig. 7 Schematischer Querschnitt senkrecht zum Resonator eines Lasers aus Indium-Galliumarsenid-Phosphid nach dem Prinzip «Graded Index-Separate Confinement Heterostructure-Multi Quantum Well» (GRIN-SCH-MQW) für eine Emissionswellenlänge von 1,3 µm - Coupe schématique perpendiculaire au résonateur d'un laser phosphure et arséniure d'indium et de gallium selon le principe du «Graded Index-Separate Confinement-Heterostructure-Multi Quantum Well» (GRIN-SCH-MQW) pour une longueur d'onde d'émission de 1,3 µm

Die aktive Schicht besteht aus vier Potentialtöpfen aus InGaAsP mit einer Bandlücke entsprechend einer Wellenlänge λ_g von 1,32 µm, getrennt durch drei Barrieren mit grösserer Bandlücke. Die Dicke des gesamten GRIN-SCH-MQW-Schichtpakets beträgt 345 nm – La couche active se compose de quatre puits de potentiel en InGaAsP avec un écart interbandes correspondant à une longueur d'onde λ_g de 1,32 µm, séparés par trois barrières à écart supérieur. L'épaisseur de l'ensemble de couches GRIN-SCH-MQW est de 345 nm

simple lame quart d'onde d'un matériau diélectrique adapté à l'indice de réfraction permet d'atteindre des coefficients de réflexion résiduelle de $10^{-3}...10^{-4}$, à condition toutefois que la longueur d'onde soit invariable. Si l'amplificateur doit en revanche être utilisable dans des systèmes à multiplexage par répartition en longueur d'onde, le traitement antiréflexion doit être à large bande. A cette fin, on utilisera un système multicouches ainsi que des matériaux diélectriques dont les indices de réfraction sont différents, par exemple SiO_x, TiO_x (x = 1...2) ou Al_2O_3. Une bonne atténuation de la réflexion est importante pour deux raisons: Premièrement, la réflexion résiduelle entraîne des modes Fabry-Perot qui, en présence des fréquences correspondantes, affaiblissent devantage l'inversion dans le support actif. Il s'ensuit une ondulation du gain en tant que fonction de la longueur d'onde (gain ripple). Pour une amplification moyenne de 25 dB, celle-ci est par exemple de 5 dB lorsque la réflexion résiduelle est de 10^{-3} et atteint encore 0,5 dB [12] lorsque la réflexion résiduelle est de 10^{-4}. Deuxièmement, la réflexion résiduelle est à l'origine de distorsions d'intermodulation provoquées par des mélanges en quart d'onde: Un coefficient de réflexion de 5×10^{-4} est déjà suffisant pour doubler le degré de distorsion lors d'une amplification au passage de 25 dB (valeur typique) [13].

Un autre problème réside dans l'amplification soumise à la polarisation. Celle-ci a également été analysée dans le cadre d'un projet de recherche soutenu par les PTT [14]. L'effet se fonde sur les profils différents des modes TE et TM dans les guide d'ondes à section rectangulaire de cavités typiques de lasers à semi-conducteurs. Des différences d'amplification jusqu'à 7 dB selon la polarisation de la lumière sont normales. Une égalité d'amplification entre polarisation TE et TM de 1 dB peut cependant être obtenue par des structures de laser particulières qui permettent d'obtenir des rapports modaux plus symétriques [15]. Des amplificateurs optiques semi-conducteurs pour 1,3 µm et 1,55 µm sont déjà disponibles dans le commerce.

Pouvant être pleinement intégrés, les amplificateurs semi-conducteurs sont également utilisés dans des modules de récepteur comme préamplificateurs optiques pour renforcer la sensibilité de détection ou dans des réseaux de distribution passifs pour compenser l'affaiblissement intrinsèque de signaux. Etant donné qu'un circuit optique intégré doit finalement être relié au monde extérieur par des fibres optiques, le problème d'amplification peut naturellement aussi être déplacé vers celui-ci. Des fibres optiques appropriées peuvent en effet exercer la fonction d'amplificateurs optiques. De telles fibres optiques amplificatrices offrent certains avantages par rapport aux amplificateurs semi-conducteurs tout en ayant l'inconvénient de dépendre d'un pompage optique. En d'autres termes, elles doivent être approvisionnées en énergie par un laser semi-conducteur de puissance. Il est évident que des lasers de ce type peuvent être utilisés aussi dans l'optique intégrée comme sources lumineuses très puissantes. Dans le présent article, les fibres optiques amplificatrices ne seront pas traitées en détail. Les *«Graded Index Separate Confinement Heterostructure* Mulit Quantum Well»-Laser (GRIN-SCH) sont particulièrement appropriés pour ser-

gewisse Vorteile, sind aber auch mit dem Nachteil behaftet, dass sie optisch gepumpt, d. h. von einem Hochleistungshalbleiterlaser mit Energie versorgt werden müssen. Derartige Laser könnten natürlich auch in der integrierten Optik als Quellen mit hoher Lichtleistung Verwendung finden. Auf die Faserverstärker selber soll hier nicht näher eingegangen werden. Besonders geeignet für die Anwendung als Pumplaser sind *«Graded-Index Separate-Confinement Heterostructure* Multi Quantum Well Laser» (GRIN-SCH-MQW). Dieses neuartige Konzept ermöglichte erstmals den Bau schmalbandiger Halbleiterlaser mit Dauerausgangsleistungen von deutlich über 10 mW. *Figur 7* zeigt einen Querschnitt durch einen solchen Laser [16] für eine Emissionswellenlänge von 1,3 µm. Unten und oben schliessen Schichten unterschiedlicher Zusammensetzung mit graduell zunehmender Bandlücke, bis zum reinen Indiumphosphid (Fig. 4), an die aktive Zone (MQW) an. Diese Begrenzungsschichtstruktur vergrössert dank ihrem nach aussen hin abnehmenden Brechungsindex die effektive Wellenleiterdicke. Dadurch verläuft ein grösserer Anteil der geführten Welle ausserhalb der aktiven Zone in absorptionsarmem Material. Dies ermöglicht die Verwendung eines längeren Laserresonators mit höherer Gesamtverstärkung. Der Schwellstrom bleibt dabei auf einem tiefen Niveau, da nur das MQW-Volumen gepumpt werden muss. Zusätzlich begrenzen im dargestellten Beispiel pn-Dioden aus Indiumphosphid, die beim Laserbetrieb in Sperrichtung gepolt sind, sowohl den Stromfluss wie auch die geführte optische Welle seitlich auf 2 µm. Diese pn-Dioden und die darüberliegenden Deckschichten wurden nach abgeschlossener nasschemischer Strukturierung des «GRIN-SCH-MQW»-Schichtpaketes in einem getrennten, zweistufigen Dampfabscheideprozess aufgebracht. Dieser Laser erreicht eine Dauerausgangsleistung von 100 mW und einen totalen Wirkungsgrad von 50 %.

(Fortsetzung folgt)

vir de lasers de pompage. Cette conception nouvelle a permis pour la première fois de construire des lasers semi-conducteurs à bande étroite avec des puissances de sortie continues dépassant largement 10 mW. La *figure 7* représente une section transversale d'un tel laser [16] pour une longueur d'onde d'émission de 1,3 µm. Dans le haut et le bas, on constate que des couches de composition différente dont l'écart interbandes s'agrandit graduellement jusqu'au phosphure d'indium pur (fig. 4) touchent à la zone active (MQW). Cette structure de la couche limite fait que l'épaisseur effective du guide optique s'accroît en raison de l'indice de réfraction régressif vers l'extérieur. Ainsi, une plus grande partie de l'onde guidée circule en dehors de la zone active dans du matériau à faible absorption, permettant l'utilisation d'un résonateur laser plus long produisant une amplification totale supérieure. Le courant de seuil demeure, lui, à un niveau peu élevé, puisque seul le volume MQW doit être pompé. Dans l'exemple illustré, des diodes pn en phosphure d'indium, qui sont polarisées dans le sens inverse dans le régime laser, entraînent en plus une limitation latérale de 2 µm aussi bien de la conduction de courant que de l'onde optique guidée. Ces diodes pn et les couches qui les recouvrent ont été déposées en phase vapeur par un procédé spécial à deux phases après la structuration de l'ensemble de couches «GRIN-SCH-MQW» par voie d'attaque en solution. Ce laser atteint une puissance de sortie permanente de 100 mW et un rendement total de 50 %.

(A suivre)

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, 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 $\Delta\beta$ techniques, IEEE Transactions on Circuits and Systems CAS-26, 1099 (1979).

[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 — Transmission optique cohérente. 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 $\lambda/4$ 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 µm 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. Lightwave 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 multiple 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 die 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 175 Z, Ascom Tech 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 waveguides, 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.