Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 88 (1997)

Heft: 3

Artikel: Nichtperiodische Konzepte in integrierten optischen Wellenleiterstrukturen

Autor: Erni, Daniel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902178

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: 09.12.2025

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

Das Abrücken von der «periodischen Denkweise» bei der Herstellung optischer Wellenleiter-Gitterstrukturen birgt ein riesiges Potential sowohl in praktischen als auch in theoretischen Bereichen der integrierten Optik. Unter welchen Voraussetzungen können diese neuen Möglichkeiten erschlossen und nutzbringend eingesetzt werden? Der nachfolgende Beitrag versucht sich von verschiedenen Seiten einer möglichen Antwort zu nähern.

Nichtperiodische Konzepte in integrierten optischen Wellenleiterstrukturen

■ Daniel Erni

Die Untersuchung von elektromagnetischen Feldern in nichtperiodischen Strukturen der integrierten Optik erfordert beinahe vollständige Kenntnisse über die involvierten optischen Streuprozesse. So muss einerseits der vielfältigen Natur des elektromagnetischen Feldes genaustens Rechnung getragen werden, und andererseits ist man vor das Problem gestellt, dass der Übergang von der ausführlich untersuchten periodischen Gitterstruktur zu einer nichtperiodisch gestörten Wellenleitertopologie auf unzählbar viele Weisen vollzogen werden kann. Gerade dieser Umstand verschärft die Entwurfsproblematik dramatisch. Anhand von zwei praktischen Beispielen soll ein möglicher Ausweg skizziert werden, der sich auf das attraktive Optimierungswerkzeug der evolutionären Algorithmen abstützt. Ganz zum Schluss wird noch ein Ausblick gewagt, wobei der sogenannte Photonenkristall – stellvertretend für die allgemeinste Form des optischen Streuproblems – einen der aktuellsten Forschungsschwerpunkte zu diesem Thema darstellt.

Zerlegung des elektromagnetischen Feldes

Beugung und Streuung von geführten elektromagnetischen Wellen in dielektrischen Wellenleitern mit periodisch deformierten Grenzflächen werden bereits seit den Anfängen der integrierten Optik in den 50er Jahren intensiv untersucht. Ein Grund hierfür sind sicher die vielfältigen und oft auch einzigartigen Eigenschaften, welche solche Strukturen zu bieten haben und die sich konsequenterweise in den unterschiedlichsten Anwendungen widerspiegeln. All diese Eigenschaften basieren auf einem fundamentalen physikalischen Mechanismus: dem Energietransfer zwischen den verschiedenen elektromagnetischen Wellentypen.

Grundsätzlich enthält bereits eine einzelne Wellenleiterstörung stets die Möglichkeit, dass ein geführtes Wellenfeld an der Störstelle eine Vielzahl von Wellentypen anzuregen vermag. Dies äussert sich beispielsweise durch ein Strahlungsfeld, das von dieser Störung ausgehend in den Raum wegpropagiert. Die Störung wird meistens auch als Reflexionsstelle im Wellenleiter wahrgenommen, an der das geführte Wellenfeld Energie in eine geführte rücklaufende Welle koppelt. Ein Anteil der Feldenergie kann zudem in der Gestalt von abklingenden evaneszenten Modi auftreten oder sich in einem pseudogebundenen Wellenfeld befinden, das sich über grössere Distanzen nahe der und parallel zur optischen Achse ausbreitet. Diese spezielle Form des Strahlungsfeldes wird oft mittels geführter Modi beschrieben, welche sich nur wenig unterhalb ihrer Grenzfrequenz befinden; sie ist in der Literatur [1] unter dem eigenständigen Begriff Leckmodi (Leaky Modes) bekannt. In speziellen Situationen kann aber auch ein anderer Wellentyp auftre-

Adresse des Autors
Dr. *Daniel Erni*, Institut für Feldtheorie und Höchstfrequenztechnik ETH, Gloriastrasse 35
8092 Zürich

ten, der, im Unterschied zu den Leckmodi, keine Strahlungsverluste aufweist, also echt geführt ist. Solche diskreten Eigenlösungen des Wellenleiterproblems heissen Oberflächenmodi (Surface Modes) [2], weil sich deren Energie an der Oberfläche einer Wellenleitergrenzschicht konzentriert. Obwohl der Begriff der «Mode» im allgemeinen sehr präzise definiert ist, bezeichnet die Mode in diesem Zusammenhang einen Ausbreitungszustand des elektromagnetischen Feldes und kann als identisch mit Begriffen wie «Feldtyp» oder «Wellentyp» betrachtet werden.

Ungeachtet dieser Vielfalt an Modi, dieses regelrechten «Zoos» an Wellentypen, soll sich niemand darüber hinwegtäuschen, dass es sich stets um eine formale – meist unvollständige Beschreibung – eines physikalisch realen Gebildes handelt: die Beschreibung des elektromagnetischen Feldes mit Hilfe von mathematisch zugänglichen Wellentypen. Je nach Komplexität der Problemstellung wäre es durchaus denkbar, dass neue Wellentypen «entdeckt» werden könnten beziehungsweise beigezogen werden müssten. Dagegen kann man allerdings zwei gewichtige Gegenargumente ins Feld führen: erstens genügen bei konkreten Praxisbeispielen bereits Feldapproximationen, die einen bis zwei Wellentypen enthalten, und zweitens gibt es in der linearen Feldtheorie eine noch viel fundamentalere Zerlegung des elektromagnetischen Feldes – die sogenannte Multipolentwicklung [3] –, welche dem Anspruch der Vollständigkeit gerecht wird. Auf diese kann hier allerdings nicht näher eingegangen werden.

Interessanterweise ist bereits die einzelne, «mikroskopische» Wellenleiterstörung schon in der Lage, eine solche Zerlegung des Feldes in die entsprechenden Modi vorzunehmen. Allgemein betrachtet ist eigentlich jede Art von Inhomogenität dazu imstande, eine solche Zerlegung auszulösen: sei es eine Inhomogenität von räumlicher Natur, wie zum Beispiel die eben beschriebene Wellenleiterstörung, eine sehr lokale Feldquelle im Wellenleiter oder eine Störung zeitlicher Natur, wie sie zum Beispiel durch den Einschaltvorgang einer beliebigen Feldquelle wiedergegeben wird. Die «mikroskopische» Qualität der Inhomogenität ist somit lediglich für die Artenvielfalt innerhalb der Feldzerlegung verantwortlich, welche es in der Folge nun für praktische Zwecke auszunutzen gilt. Die zentrale Fragestellung, die uns durch diesen Beitrag begleiten wird, lautet daher: Wie müssen derartige «mikroskopische» Störungen entlang einer Wellenleiterstruktur angeordnet werden, damit ein spezifischer Wellentyp in dieser Zerlegung bevorzugt wird und dadurch eine charakteristische und nutzbringende «makroskopische» Eigenschaft wie zum Beispiel Abstrahlung, Reflexion oder spektrale Filterung resultieren kann?

Periodisch gestörte Wellenleiterstrukturen

Eine der einfachsten geometrischen Anordnungen «mikroskopischer» Streuzentren wird durch die periodisch gestörte Wellenleiterstruktur wiedergegeben. Dieses eindimensionale Gitter stand bei unterschiedlichen Gebieten der Physik oft ganz im Zentrum der entsprechenden Studien. Trotz der Tatsache, dass periodische Strukturen bereits in den 30er Jahren intensiv untersucht worden sind[1], war es Brillouin, der gegen Mitte der 50er Jahre in seinem umfassenden Werk [4] alle Erscheinungsformen der Wellenausbreitung in periodischen Strukturen auf allgemeine Formalismen wie die Kettenleitertheorie oder die Beschreibung periodischer Strukturen mittels charakteristischer Matrizen zurückgeführt hat. Diese Beiträge haben denn auch die meisten der heute verwendeten Berechnungsmethoden geprägt. So spielte die Kettenleitertheorie in den 60er Jahren nicht nur beim Entwurf von Mikrowellenfiltern, periodischen Antennen und Slow-Wave-Strukturen, sondern auch bei der theoretischen Analyse gepumpter Strukturen, wie Wanderwellenverstärkern und Rückwärtswellenoszillatoren, noch immer eine tragende Rolle.

Im Rahmen der integrierten Optik werden periodische Wellenleitergitter vor allem als Koppler oder wellenlängenselektive Reflektoren eingesetzt. Die Anwendung als Gitterkoppler ermöglicht eine äusserst elegante Auskopplung von Licht aus der Oberfläche des integrierten optischen Chips. Dies bedingt aber, dass ein möglichst effektiver Energietransfer vom geführten Wellenfeld im Filmwellenleiter an die gewünschte Beugungsordnung des Strahlungsfeldes erfolgen kann, ohne dass dabei eine zusätzliche Reflexion am Gittereingang wahrnehmbar wird. Gerade umgekehrt sind die Anforderungen an eine wellenlängenselektive Reflektorstruktur. Hier soll die Kopplung nur zwischen einem gleichartigen hin- und rücklaufenden geführten Wellenfeld stattfinden, was als zusätzliche Bedingung eine resonante Natur dieser Kopplung voraussetzt. Entspricht zum Beispiel eine halbe optische Wellenlänge des geführten Wellenfeldes gerade dem Störstellenabstand (Gitterperiode) der Wellenleiteranordnung, so spricht man von einer Bragg-Resonanz 1. Ordnung. In dieser Situation agiert das Wellenleitergitter als ideale Bandsperre, zumal nebst den geführten Wellen keine weiteren Wellentypen wie Strahlungsmodi angeregt werden. Derartige Bragg-Reflektoren übernehmen zum Beispiel in Halbleiterlaserdioden die Funktion von äusserst schmalbandigen, wellenlängenselektiven Endspiegeln und ermöglichen so die Realisierung einer einmodigen und damit sehr kohärenten Lichtquelle (DBR-Laser).

Das Entwurfsvorgehen bei solchen periodischen Gitterstrukturen gestaltet sich in den meisten Fällen relativ einfach und ist von der Funktionalität des zu realisierenden Bauelements geprägt. Der eigentliche Entwurf beschränkt sich somit lediglich auf die richtige Wahl des anzukoppelnden Wellentyps. Damit wird auch gleich die Frage nach resonanter oder nichtresonanter Kopplung beantwortet. Vorgaben wie Sperrbandbreite und Filterselektivität bei Bragg-Reflektoren oder Kopplungseffizienz bei Gitterkopplern hängen hauptsächlich von der entsprechenden Kopplungsstärke und somit direkt von der Form der Wellenleiterstörung ab. Da die Form der einzelnen Störstelle in der bisherigen Terminologie eine «mikroskopische» Qualität besitzt, die Periodizität hingegen eine «makroskopische» Eigenschaft der Struktur darstellt, bedeutet ein optimaler Gitterentwurf mitunter auch ein geschicktes Ausloten der Balance zwischen intrinsischen (Mie-Resonanz) und extrinsischen (Bragg-Resonanz) Streuprozessen.

Das Entwurfsproblem bei nichtperiodischen Wellenleiterstrukturen

Der Entwurf von periodisch gestörten Wellenleiterstrukturen kann grundsätzlich auch auf nichtperiodische Strukturen ausgedehnt werden, zumal die Entwurfsvorgabe eigentlich keine Periodizität vorschreibt. Nichtperiodische Wellenleiterstrukturen haben gegenüber periodischen Varianten den Vorteil, dass zum Beispiel eine vorgegebene Filterfunktion mit weniger Einschränkungen auskommt und oft auch genauer realisiert werden kann. Erkauft wird dieser Vorteil mit einem komplizierten Entwurfsverfahren, da hier

[1] Neben der Bragg-Reflexion und Röntgenbeugung an Kristallen kannte man damals bereits praktische Beispiele periodischer Filterstrukturen in der Telefonie. Zudem wurde die Theorie der Metalle und später dann die moderne Festkörpertheorie vollständig auf der Existenz von Pseudoteilchen aufgebaut, die nichts anderes als Lösungen solcher periodischen Raumgitterstrukturen darstellen.

Zum Projekt

Der nichtperiodisch segmentierte Modenkonverter wurde am Institut für Feldtheorie und Höchstfrequenztechnik der ETH Zürich im Rahmen eines KTI-Projektes zusammen mit dem IBM-Forschungslaboratorium, Rüschlikon, entwickelt. In diesem Projekt sollen für den Wellenlängenbereich von 1520 nm bis 1570 nm passive integrierte Glaswellenleiter-Komponenten hergestellt werden, die in schnellen optischen Wellenlängen-Multiplex-Netzwerken (WDM-Netzen) eingesetzt werden können. Diese relativ billige Glastechnologie erweist sich gerade im Hinblick auf eine Massenfertigung von rein optischen MAN- und WAN-Netzwerktopologien mit hohen Datenübertragungsraten (bis 2,488 GBit/s) als äusserst vielversprechend.

Zu den hier beschriebenen Forschungsaktivitäten haben Jürg Fröhlich (Optimierer) und Michael Spühler (Modenkonverter) mit ihren eigenen Untersuchungen Wesentliches beigetragen. Das Projektteam kann für weitere Fragen unter http://www.ifh.ee.ethz.ch/staff.html erreicht werden.

strenggenommen ein sogenanntes inverses Streuproblem vorliegt. Im allgemeinen sind solche Probleme nicht trivial und können nur noch mit Hilfe aufwendiger Lösungsverfahren wie zum Beispiel dem Lösen komplizierter Integralgleichungen [5] berechnet werden, wobei meistens noch einschneidende Vereinfachungen vorzunehmen sind. Auch entbehrt ein solcher Formalismus meistens der Klarheit, die zumindest für ein intuitives Nachvollziehen der erhaltenen Lösung vertrauensbildend ist, was wiederum eine einfache und direkte Methode um so wünschenswerter erscheinen lässt. Im Umfeld der bereits existierenden Entwurfsverfahren für Wellenfilter und Siebketten hat Pohlack ein direktes Näherungsverfahren mit Hilfe von spektralen Approximationskurven (z. B. Tschebyscheff-Polynomen) in seiner umfassenden Arbeit [6] erstmals im Hinblick auf optische Filterstrukturen formalisiert. Diese Methode beruft sich auf die grosse Ähnlichkeit zu einem konventionellen LC-Filterentwurf aus der elektrischen Netzwerktheorie. Pohlack betont aber im Schlusswort, dass hier lediglich «eine systematische Durchdringung (der Problemstellung) mit Hilfe synthetischer Methoden» vorliege.

Eine interessante Klasse nichtperiodischer Strukturen ist durch die selbstähnlichen und quasiperiodisch angeordneten Störstellenverteilungen gegeben. Selbstähnliche oder quasiperiodische Topologien, wie sie zum Beispiel die Cantor- oder die Fibonacci-Sequenz darstellen, können im Vergleich zu den periodischen Wellenleitergittern eine extrem ausgeprägte Filterselektivität bei einer signifikant kleineren Anzahl gekoppelter Wellenleiterabschnitte aufweisen. Ähnlich wie bei den periodischen Strukturen werden diese deterministischen Störstellensequenzen (Störstellensequenz und resultierendes Reflexions- oder Transmissionsspektrum können jeweils direkt nach einer vorliegenden Vorschrift ineinander umgerechnet werden) auch für die Herstellung von einmodigen Halbleiterlaserdioden vorgeschlagen [7], wobei man sich hier die praktisch ideale Filtereigenschaft der Laserkavität zunutze macht. Da bei dieser Klasse von nichtperiodischen Wellenleiterstrukturen mit der Störstellensequenz auch das zugehörige Spektrum gleichzeitig bekannt ist, vereinfacht sich der Entwurfsvorgang, da lediglich die Parameter der zugrundeliegenden Störstellenabfolge entsprechend zu variieren sind und der geeignete spektrale Ausschnitt gefunden werden muss. Erkauft wird diese Vereinfachung aber durch die Notwendigkeit, sich umfangreiches Apriori-Wissen über das gesamte Spektrum anzueignen.

Eine einfache Möglichkeit, sich die fehlenden Apriori-Kenntnisse effizient zu erarbeiten, besteht in der In-situ-Optimierung (Trial-and-Error-Methode) einer einfach strukturierten Störstellensequenz; dabei wird, unter strenger Überwachung des resultierenden Filterverhaltens, Störstelle um Störstelle dem Wellenleiter beigefügt, bis die Filterfunktion den vorgegebenen Spezifikationen genügt. Hier liegt sozusagen eine Übergangssituation zwischen streng deterministischer Vorgabe und heuristisch umgesetzter Entwurfspraxis vor.

Die Anwendung evolutionärer Algorithmen (EA) stellt die konsequenteste Art einer heuristischen Entwurfsmethode dar, da keine Vorkenntnisse bezüglich der angestrebten Lösung notwendig sind, dafür aber einiges an Information über das Charakteristische einer guten Lösung abfällt. Im Fall genetischer Algorithmen verlagert sich der Aufwand allein in die geeignete Problemrepräsentation der Wellenleiterstruktur, worin auch die Formulierung eines adäquaten Qualitätsmasses, welches den gewünschten Problemspezifikationen Rechnung tragen muss, enthalten ist. Als Fazit darf durchaus festgehalten werden, dass im Zusammenhang mit den angesprochenen Entwurfsverfahren ein fliessender Übergang von der «systematischen Durchdringung» [6] der Problemstellung bis hin zur selbsttätigen Lösungssuche stattgefunden hat – also ein Übergang vom deterministischen Entwurf zur heuristischen Optimierung. Die angestrebte Systematisierung der unterschiedlichen Entwurfsmethoden wird in Tabelle I nochmals zusammengefasst.

In den folgenden zwei Abschnitten wird auf ein erstes Entwurfsbeispiel näher eingegangen, das ein anspruchsvolles Filterproblem in der Gestalt einer nichtperiodisch gekoppelten Mehrsektionen-Halbleiterlaserdiode löst.

Die nichtperiodisch gekoppelte Mehrsektionen-Laserdiode

Eine einfache, billige monolithisch integrierte Halbleiter-Laserdiode mit einer Emissionswellenlänge von ungefähr 850 nm wäre eine sehr attraktive Lichtquelle, die sich in der Messtechnik-Industrie im Zusammenhang mit hochpräzisen Frequenz- und Distanzmessungen einer sehr regen Nachfrage erfreuen würde. Nahezu monochromatisches Licht hoher Kohärenz bei dieser vorgegebenen Emissionswellenlänge bedingt aber, dass die Ausbildung eines einzigen Schwingungszustandes des elektromagnetischen Feldes in der Laserkavität nicht nur bevorzugt, sondern auch kontrolliert werden muss. Dies erreicht man durch eine

Entwurfs-Methodik	Erforderliches Apriori-Wissen über Struktur und Spektrum	Information über mögliches Optimierungs-potential	Qualität der Lösung
direkte	nur spezifisch	wenig	approximativ
deterministische	viel	viel lokale	gut
in situ	wenig	keine	realistisch gute
evolutionäre	keines	viel globale	realistisch beste

Tabelle I Systematisierung der unterschiedlichen Entwurfsmethoden

spezielle Formgebung der Kavität. Man kann diese beispielsweise als räumliches Filter anlegen, damit die Topologie der Laserkavität nur für das Licht in einem schmalen Wellenlängenbereich wirksam ist. In Frage kommt zum Beispiel die bereits angesprochene wellenlängenselektive Verspiegelung der Laserkavität, die mit Hilfe passiver verteilter Bragg-Reflektoren realisiert werden kann (DBR-Anordnungen). Bei der Distributed-Feedback-Anordnung wird die verteilte Rückkopplung der Welle bereits innerhalb der aktiven Lasersektion vollzogen, die somit selbst als Wellenleitergitter ausgebildet sein muss. Wegen der Bragg-Resonanzbedingung sind beide Methoden auf extrem feine Gitterstrukturen angewiesen, deren Periode nur wenige hundert Nanometer betragen. Solche Ansprüche stellen auch heute noch eine ernsthafte Herausforderung für die moderne lithographische Reproduktionstechnik dar, was in der Regel mit kleinen Stückzahlen verbunden ist und sehr hohe Kosten zur Folge hat. Eine weit einfachere Möglichkeit, um Einmodenbetrieb zu erreichen, bietet zum Beispiel die Anordnung mit mehreren periodisch gekoppelten Laserabschnitten. Auf einen ersten Blick besteht der Unterschied zu einer üblichen Wellenleiter-Gitterstruktur einzig darin, dass die Periode der Störung um Grössenordnungen über derjenigen des Bragg-Gitters liegt, was die Herstellung einer solchen Struktur erheblich vereinfacht. Wie bereits erläutert wurde, ist die Ausdehnung der Topologie auf nichtperiodisch gekoppelte Laserstrukturen mit einem Gewinn an zusätzlichen Freiheitsgraden verbunden. Zwei Realisierungsmöglichkeiten einer derartigen Laserstruktur sind in Bild 1 dargestellt. Die durch die Störung hervorgerufene Brechzahlvariation beträgt in beiden Fällen weniger als 1% bezogen auf die effektive Brechzahl der Laserkavität von etwa 3,2.

Entwurf mittels evolutionären Algorithmen

Die evolutionären Algorithmen bilden eine spezielle Klasse unter den heuristischen Optimierungsverfahren. Sie versuchen den Suchprozess der natürlichen Evolution nachzubilden und können daher auch als ein stark vereinfachtes Modell des darwinistischen Entwicklungsprozesses betrachtet werden. Eine sehr anschauliche Einführung in dieses Thema bietet der Beitrag von Thomas Blickle im Bulletin SEV/VSE 1995/25.

Bei der Optimierung von Mehrsektionen-Laserstrukturen erweist es sich als vorteilhaft, den entsprechenden Genotyp (Erbanlage) als ein Bit-Wort fixer Länge auszuführen. Es muss also eine passende Repräsentation der physikalischen Laseranordnung gefunden werden, die sich möglichst sinnvoll in den Genotyp überführen lässt. Die physikalische Repräsentation des einzelnen Individuums bezeichnet man als Phänotyp (Erscheinungsbild, Art). Dieser lässt sich zum Beispiel für den in Bild 2 dargestellten Fall ziemlich direkt in das entsprechende Chromosom (Erbanlage) codieren. Hier repräsentiert ein Laserabschnitt der Länge δL mit Brechzahl N_a ein Null-Bit, der Abschnitt mit Index N_b hingegen ein Eins-Bit. Wenn ein Mehrsektionen-Laser eine maximale Länge $L=1000$ µm aufweisen darf und gleichzeitig die kürzeste Kavität auf einen minimalen Wert von $\delta L=5$ µm festgelegt ist, so enthält das Chromosom $B=L/\delta L=200$ Bit. Der Suchraum besteht somit aus der unvorstellbar grossen Zahl von 2^{200} verschiedenen Laserstrukturen!

Der implementierte evolutionäre Algorithmus wurde für eine veränderliche Laserlänge und eine variable Anzahl von Lasersektionen modifiziert [7] und erzeugt in unserem Beispiel eine Anfangspopulation von 50 Individuen, gemäss einem reinen Zufallsprozess beziehungsweise unter Anwendung einer vorgegebenen heuristischen Regel. Die einzelnen Individuen werden zudem anhand ihrer Fitness in eine Rangliste eingegliedert.

Die Fitness-Funktion ist nichts anderes als das bereits definierte Qualitätsmass, welches angibt, wie gut die Lösung

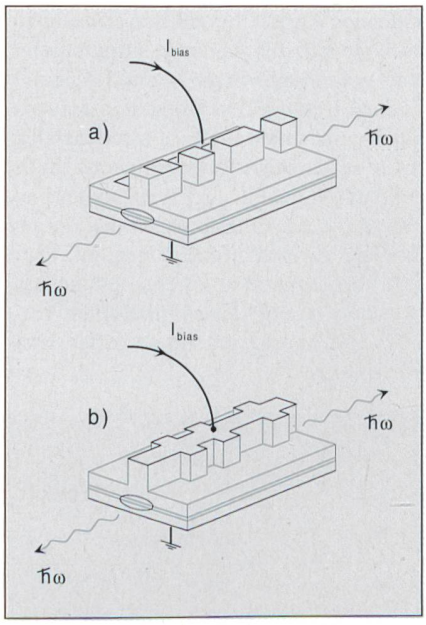

Bild 1 Realisierung der nichtperiodisch gestörten Laserstruktur

Die effektive Brechzahlvariation wird mittels Variation der Rippenhöhe (a) oder Variation der Rippenbreite der Wellenleiterstruktur (b) erreicht.

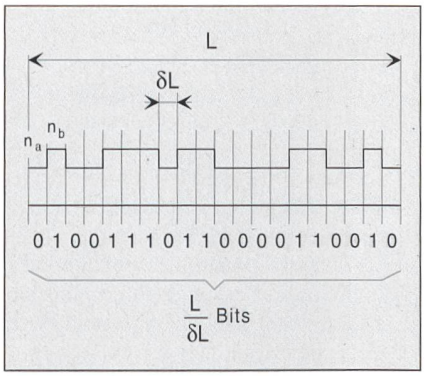

Bild 2 Repräsentation der Laserstruktur

Das Schema zeigt eine Transformation vom Phänotyp zum Genotyp oder konkret eine Transformation von der Mehrsektionen-Laseranordnung zum Bit-Wort des Chromosoms.

der berechneten Laserstruktur mit den gewünschten Spezifikationen übereinstimmt. In allen Simulationen werden daher drei Qualitätsfaktoren summiert. Die einzelnen Güte-Kriterien sind so ausgelegt, dass eine maximale Fitness resultiert, falls der Laser exakt bei einer Wellenlänge von 852 nm anschwingt (Laserschwelle), die optische Verstärkung des Lasermaterials bei derselben Wellenlänge ein Maximum aufweist und die Modenselektivität in bezug auf das Filterverhalten der Round-Trip-Verstärkung möglichst gross ist. Die Round-Trip-Verstärkung beschreibt die Amplitudenverstärkung einer elektromagnetischen Welle, nachdem diese exakt einen Umgang im Laserresonator vollzogen hat.

Nach der Erzeugung der Anfangspopulation beginnt der eigentliche Suchprozess. Am Anfang einer Art Prozessschleife werden mittels zufallsgesteuerter Roulette-Wheel-Selektion zunächst zwei Eltern-Individuen ausgewählt. Diese zeugen – unter Anwendung der 2-Punkt-Kreuzung mit anschliessender Mutation – zwei Nachkommen. Die Mutation sorgt übrigens dafür, dass die Chromosomen der Nachkommen an zufallsbedingten Stellen zusätzlich verändert werden. Dies ist der einzige Weg, neue Information in eine sich entwickelnde Population einzutragen. Sind die so gezeugten Nachkommen einmalig, so werden sie evaluiert und der Population beigefügt. Andernfalls erhalten sie den Fitnesswert 0, was einen Verbleib in der Population ausschliesst. Die jetzt um zwei Individuen erweiterte Population wird gemäss der Fitness-Werte sortiert und wieder auf die ursprüngliche Grösse von 50 Individuen begrenzt, was bewirkt, dass die beiden schlechtesten Individuen am Ende der Rangliste aus der Population herausfallen. Gerade diese absolute Ranglistensortierung erwies sich im Zusammenspiel

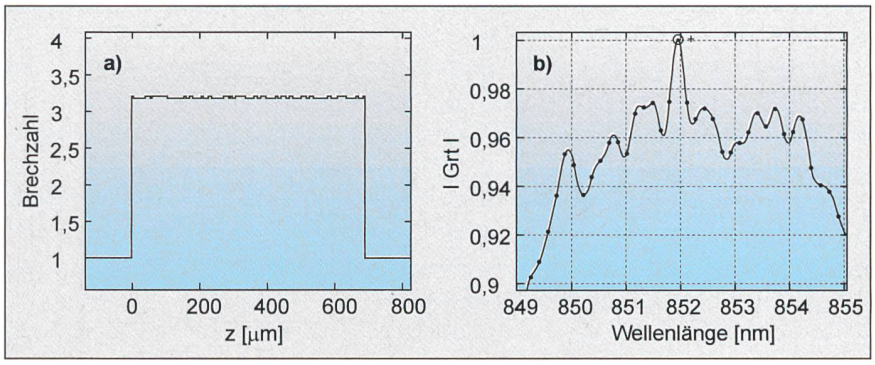

Bild 3 Evolutionär optimierte Laserstruktur

a) Brechungsindexverteilung entlang der Laserkavität
b) Spektrum der Round-Trip-Verstärkung. Die Laseroszillation ist mit einem eingekreisten Punkt markiert. Die übrigen Punkte repräsentieren weitere Modi, die potentiell anschwingen können, und das feine Kreuz kennzeichnet das Maximum der optischen Materialverstärkung.

mit der implementierten fitnessproportionalen Roulette-Wheel-Selektion als sehr erfolgreich; sie stellt einen sehr strengen Züchtungsprozess dar [7]. Der evolutionäre Algorithmus ist nun wieder bereit, in einem nächsten Zyklus zwei neue Eltern-Individuen auszuwählen. Die Prozessschleife wird genau dann abgebrochen, wenn entweder eine vorgegebene Anzahl Reproduktionszyklen abgearbeitet ist oder die Varianz der Fitness-Werte innerhalb der Population einen vorgeschriebenen Wert unterschreitet.

Die Simulationen der Mehrsektionen-Laserstruktur wurde mit Hilfe der Transfer-Matrix-Analyse [8] durchgeführt, wobei der evolutionäre Algorithmus im ganzen über 1270 Laservarianten evaluiert hat. Die Strominjektion erfolgte in die Segmente mit der grösseren Brechzahl. Eine optimale Struktur wurde nach lediglich 819 Iterationen gefunden; sie enthält gemäss Bild 3 41 unterschiedliche Lasersektionen und weist eine Gesamtlänge von 690 µm auf. Aus dem Filterverhalten der Round-Trip-Verstärkung ergibt sich eine Emissionswellenlänge von 851,96 nm, wobei für diese Laseroszillation ein Schwellstrom von 12,305 mA notwendig ist. Wie einfach nachvollzogen werden kann, stehen diese Werte in beinahe perfekter Übereinstimmung zu den gewünschten Spezifikationen.

Der nichtperiodisch segmentierte Modenkonverter

Dass nebst dem Filterverhalten auch die optische Feldverteilung in derartigen nichtperiodischen Strukturen optimiert werden kann, soll im nächsten Beispiel zum Ausdruck kommen. Oft werden passive Elemente der optischen Telekommunikation wie zum Beispiel Koppler, Interferometer, Multiplexer und Demultiplexer in Form von Rippen-Wellenleiterstrukturen auf Glas- oder transparenten Halbleiter-Chips integriert, was wiederum verlustarme Verbindungen zwischen den Chip-Anschlüssen und der entsprechenden Glasfaser voraussetzt. Dazu muss das Modenprofil Ψ_i des Rippen-Wellenleiters möglichst präzis in das fundamentale Modenprofil Ψ_a der jeweiligen Glasfaser überführt werden (Bild 4). In konventionellen Realisierungen erforderte dies bisher eine keilförmige Variation der Rippenhöhe des integrierten Wellenleiters (Taper), was technologisch nur mit speziellem Aufwand herzustellen ist.

Eine weit elegantere Methode bedient sich der Verformung von optischen Modenprofilen in periodisch segmentierten Wellenleitern [9]. Ähnlich dem Laserbeispiel soll auch hier eine nichtperiodische Struktur zum Zuge kommen, wobei wir es wiederum einem evolutionären Algorithmus überlassen, inwieweit der Wellenleiter des zu optimierenden Modenkonverters nur in seiner Breite verändert oder gar segmentiert werden soll.

Die Kodierung der physikalischen Konverterstruktur in ein entsprechendes Chromosom erfolgt gleich wie beim Laserbeispiel. Nur werden zusätzlich Bit-Werte von 2 bis 20 zugelassen, um einer Variation der Wellenleiterbreite in diskreten Inkrementen von je 0,75 µm Rechnung zu tragen. Die Fitness-Funktion F wird für jede Position im Konverter ausgewertet und ist mit $F = 1 - L_c$ direkt mit der normierten Fehlanpassung L_c der beiden Modenprofile verknüpft, wobei der Wert von $L_c = 0$ einer perfekten Übereinstimmung, hingegen der Wert von $L_c = 1$ einer totalen Fehlanpassung des Feldes an dieser Stelle mit der Fibermode entspricht. Die Berechnung des optischen Feldes innerhalb der Konverterstruktur erfolgt mit Hilfe eines Beam-Propagation-Verfahrens [10]. Die bisher beste Struktur wurde vom evolutionären Algorithmus nach nur 931 Iterationen ermittelt (Bild 5). Sie reduziert die anfängliche Fehlanpassung von 3,5 dB auf 1,3 dB und hat grosse Ähnlichkeit mit der in [9] vorgeschlagenen Konverterstruktur. Dieses Ergebnis mag durchaus Erstaunen auslösen, zumal der evolutionäre Algorithmus zu keinem Zeitpunkt über Apriori-Kenntnisse bezüglich einer geeigneten Topologie verfügte.

Der Photonenkristall – ein moderner Forschungsschwerpunkt

Wie die beiden Entwurfsbeispiele zu veranschaulichen versuchen, bergen nichtperiodische Strukturen ein enormes

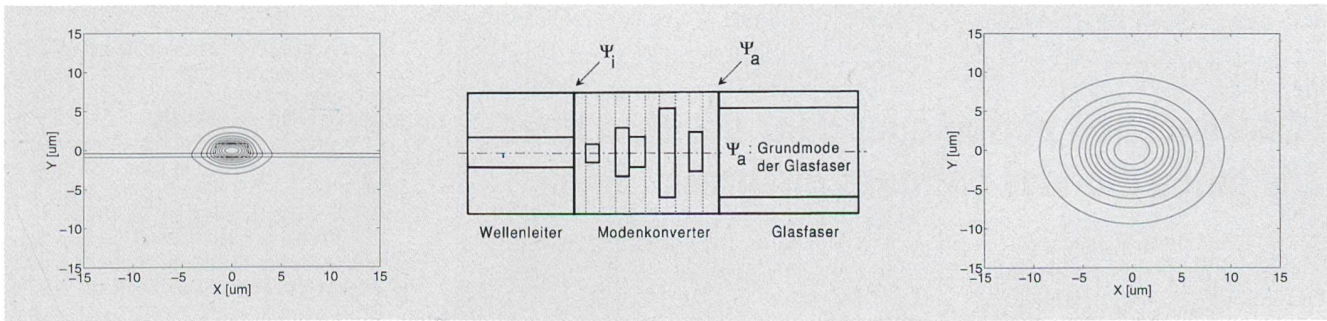

Bild 4 Problemstellung der Modenkonversion

Links: Intensitätsverteilung der Mode im Rippen-Wellenleiter (Breite 3 µm); Mitte: Aufsicht auf den Konverter; rechts: Intensitätsverteilung in der Glasfaser (Kerndurchmesser 8 µm). Die Nichtübereinstimmung der beiden Modenprofile erzeugt bei fehlendem Konverter einen Verlust von 3,5 dB.

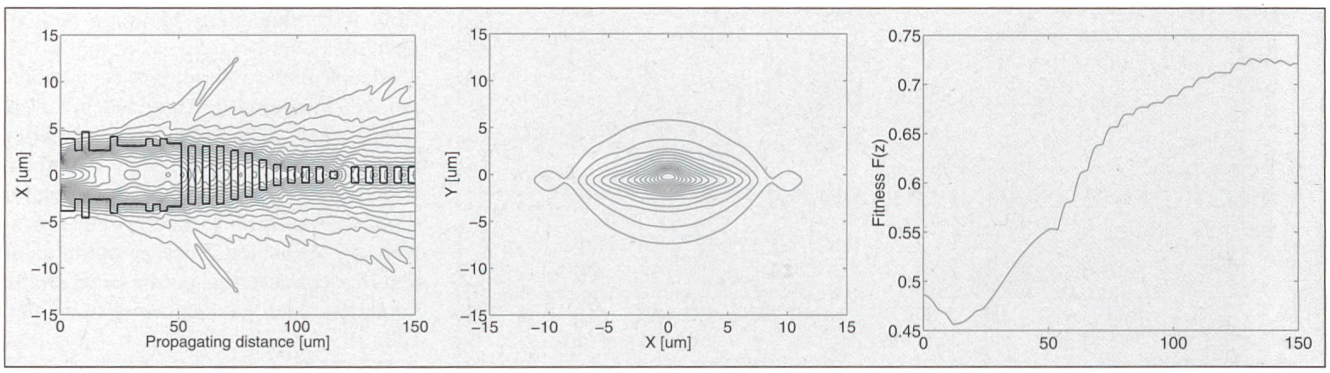

Bild 5 Optimierung einer Konverterstruktur

Links: Optische Intensitätsverteilung in der optimierten Konverterstruktur; Mitte: aufgeweitetes Modenprofil; rechts: Fitnessentwicklung entlang des Konverters.

Potential in bezug auf die «Formgebung» elektromagnetischer Felder. Diese Formgebung kann spektral, das heisst als Filtereigenschaft erfolgen oder direkt in die räumliche Natur des optischen Feldes eingreifen. Dass räumliches und spektrales Verhalten eng miteinander verkoppelt ist, dafür sorgen bereits die strengen Gesetze der Elektrodynamik. Doch sind meistens zuviel Freiheitsgrade im Spiel, als dass diese Verkopplung für die Praxis ohne weiteres ausgenützt werden könnte. Bereits die Vielfalt des anfangs erwähnten «Zoos» an unterschiedlichen Wellentypen wird jeden direkten, ingenieurmässigen Entwurf eines spektral und räumlich funktionierenden optischen Bauelementes kläglich zum Scheitern bringen.

Wir denken, dass es zwei alternative Wege aus diesem Dilemma gibt. Erstens muss der klassische Entwurf solcher optischer Strukturen generell als Optimierungsproblem verstanden werden, wobei mit den evolutionären Algorithmen ein beinahe optimales Instrument zur Verfügung steht, und zweitens wird mit Hilfe der Festkörperphysik eine analoge Situation skizziert, wo es das Energiespektrum von Ladungsträgern in Verbindung mit deren Feldverteilung zu analysieren gilt. Diese Analogie zur Festkörperphysik ist von unschätzbarem Wert, denn sie erschliesst uns eine schier unendliche Vielfalt an bereits erarbeitetem Apriori-Wissen.

Die optische Version eines Festkörperkristalls heisst naheliegenderweise Photonenkristall (photonic band-gap structure) und bildet seit weniger als fünf Jahren einen Schwerpunkt intensivster Forschungsaktivitäten [11]. Derartige dreidimensionale, nichtperiodische Raumgitterstrukturen sind entweder aus Dielektrika oder aus metallischen Stabkonstruktionen gefertigt. Sie dürfen als die allgemeinste und auch modernste Erscheinungsform eines elektromagnetischen Streuproblems betrachtet werden. Photonenkristalle eignen sich deshalb besonders gut, um Feldkonzentrationen (Photonlokalisierung) beinahe beliebiger Gestalt hervorzurufen. Solche Strukturen werden zum Beispiel in der Mikrowellentechnik als äusserst kompakte Resonatoren eingesetzt, deren Resonatorgüten, zumindest theoretisch und im Fall eines verlustlosen Dielektrikums durchaus Werte von $Q \approx 10^{10}$ erreichen könnten. Mit Hilfe dieses Ansatzes sind zum Beispiel auch inhärent resonante Halbleitermaterialien denkbar, deren zusätzliche Affinität zwischen lokalisiertem optischen Modenfeld und der resultierenden Dipolstrahlung der spontanen Elektron-Loch-Rekombination im Hinblick auf einen schwellenlosen Laser[2] ausgenützt werden kann [12].

Der schwellenlose, resonatorlose Halbleiterlaser – vor nicht allzu langer Zeit eine völlig undenkbare Vorstellung – steht nun quasi als Sinnbild für eine exotisch anmutende Entwicklung, die das Gebiet der integrierten Optik in nächster Zukunft mit Sicherheit bereichern, wenn nicht gar revolutionieren wird!

Concepts non périodiques dans des structures de guide d'ondes optiques intégrées

L'abandon de la «pensée périodique» lors de la fabrication de structures réticulaires de guide d'ondes optiques recèle un potentiel gigantesque dans les secteurs tant pratiques que théoriques de l'optique intégrée. A quelles conditions peut-on réaliser une utilisation accessible et profitable de ces nouvelles possibilités? Cet article tente de différents côtés de s'approcher d'une possible réponse.

Literatur

[1] *D. Marcuse:* Theory of dielectric optical waveguides. San Diego, California: Academic Press, 1974.

[2] *A. D. Boardman (Editor):* Electromagnetic surface modes. New York: John Wiley & Sons, 1982.

[3] *Ch. Hafner:* The Generalized Multipole Technique for Computational Electromagnetics. Norwood, Massachusetts: Artech House, 1990.

[4] *L. Brillouin:* Wave Propagation in Periodic Structures. 2nd ed., Dover Publications Inc., 1953.

[5] *G.-H. Song, S. Y. Shin:* Design of corrugated waveguide filters by the Gel'fand-Levitan-Marchenko inverse scattering method. J. Opt. Soc. Am. A 2(1985)11, pp. 1905–1915.

[6] *H. Polhack:* Die Synthese optischer Interferenzschichtsysteme mit vorgegebenen Spektraleigenschaften. Jenaer Jahrbuch 1952, pp. 181 bis 221.

[7] *D. Erni:* Periodische und nichtperiodische Wellenleitergitter- und Laserkavitätskonzepte. Diss. ETH, Nr. 11654, Zürich, 1996.

[8] *G. Björk, O. Nilsson:* A new exact and efficient numerical matrix theory of complicated laser structures: properties of asymmetric phase-shifted DFB lasers. J. Lightwave Technol. 5(1987)1, pp. 140–146.

[9] *M. H. Chou, M. A. Arbore and M. M. Fejer:* Adiabatically tapered periodic segmentation of channel waveguides for mode-size transformation and fundamental mode excitation. Opt. Lett. 21(996)11, pp. 794–796.

[10] *S. Jüngling, J. C. Chen:* A study and optimization of eigenmode calculations using the imaginary distance beam-propagation method. IEEE J. Quantum Electron., 30(1994)9, pp. 2098–2105.

[11] *S. John:* Localization of light: Theory of photonic band gap materials. In Nato ASI Series E: Applied Sciences – 315(1996), C. M. Soukoulis (Ed.), Photonic Band Gap Materials, pp. 563–665.

[12] *H. Hirayama, T. Hamano and Y. Aoyagi:* Novel surface emitting laser diode using photonic band-gap crystal cavity. Appl. Phys. Lett. 69(1996)6, pp. 791–793.

[2] Laseroszillation tritt praktisch für jeden Stromwert auf, das heisst der Laser schwingt somit auch bei extrem kleinen Strömen an.