Der planare photonische Kristall als Medium der engen Lichtführung in photonischen Chips

Autor(en): **Erni, Daniel / Robin, Franck**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **95 (2004)**

Heft 11

PDF erstellt am: **03.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857949

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Der planare photonische Kristall als Medium der engen Lichtführung in photonischen Chips

Bauelemente aus planaren photonischen Kristallen

Wie kompakt können optische Signale in der integrierten Optik überhaupt verarbeitet werden? Diese Fragestellung gerät immer mehr ins Zentrum der modernen optischen Datenkommunikation. Ähnlich grosse Packungsdichten wie bei elektronischen Chips lassen sich aber nur dann realisieren, wenn neue Wege der Lichtleitung gefunden werden.

Daniel Erni, Franck Robin

Die Demokratisierung und Kommerzialisierung der Informationsflüsse haben zu einer exponentiell zunehmenden Nachfrage nach Übertragungskapazität geführt. So wurde im Jahr 2001 bereits 8% der im Internet verfügbaren Bandbreite allein durch Angebote von Musikanbietern wie Napster belegt. Heute liegen diese Zahlen deutlich höher. Die angebotenen Dienstleistungen wie Music-on-demand werden in zunehmendem Mass durch Services wie z.B. Internetradio, Internet-TV, Movie-on-demand oder Book-on-demand ergänzt. Gemäss verschiedenen übereinstimmenden Umfragen unter Internetbenutzern entfallen rund ein Fünftel aller Online-Nutzungen auf reine Unterhaltungsangebote. Im Lichte solcher Entwicklungen scheint es auch nicht verwunderlich, dass sich die Information gänzlich von ihren Zubringern emanzipiert hat. Selbst räumliche Distanzen spielen nun keine Rolle mehr: Wir klicken auf eine Webseite, ohne je auf ihre geografische Herkunft achten zu müssen. Ein britischer Telekomanbieter verkürzte dieses Denken zur einschlägigen Werbebotschaft: «geography is history».

Grenzen der optischen Integration

Für die Forschung auf dem Gebiet der Informationstechnologie hat diese Geschichte eine technologische Pointe auf Lager. Die Herausforderung der Datenkommunikation besteht nämlich darin, dass man den Informationsfluss in den Dimensionen «Zeit», «Frequenz» und «Raum» möglichst dicht packen muss. Bildlich gesprochen: Die Bit-Raten müssen hochgeschraubt, die resultierenden Bit-Ströme auf immer mehr Frequenzkanäle verteilt und die derart organisierten Informationssignale über eine möglichst grosse Anzahl von parallel geführten Übertragungsleitungen gesendet werden. Folglich wird man die Datenübertragung stets an der Grenze des physikalisch Machbaren betreiben wollen. Das Übertragungsmedium, welches all diesen Anforderungen gerecht wird, ist die optische Glasfaser mit ihrer immensen Übertragungsbandbreite von gegenwärtig bis zu 58 THz. Ein solch enormes Transmissionsfenster könnte simultan mit 5000 verschiedenen Wellenlängenkanälen von je 10 Gb/s Datenrate belegt werden und bietet Hand zu dem, was ein Forschungsdirektor kürzlich etwas prosaisch mit «white light telecom» umschrieben hat.

Die optische Signalverarbeitung, die unter derartigen Bedingungen jeweils an beiden Enden der Glasfaserübertragung zum Einsatz kommt, heisst «Terabit-Photonik». Trotz der einschneidenden Einbrüche auf dem Telekom-Markt sind die Einträge in die Forschungsagenda der Terabit-Photonik bereits gesetzt: Voll-optische Signalverarbeitung (Licht schaltet Licht), u.a. kombiniert mit dichten Wellenlängen-Multiplex-Techniken (die Lichtsignale werden in zahlreiche Farbkanäle kodiert) und mit Bezug auf räumlich hoch skalierbare Datenkommunikationstopologien (zunehmende räumlich-parallele Signalverarbeitung bzw. Glasfaserübertragung). Der technologische Anspruch, der dieser dreifachen Zuspitzung erwächst, deutet unmissverständlich in Richtung dichter optischer Integration: Nebst der hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit müssen die zahlreichen optischen Signale stets auf engstem Raum verarbeitet werden.

Die Kurve als Schlüsselkriterium

Die normalen Lichtleitungsmechanismen, die in konventionellen optischen Wellenleitern, wie beispielsweise der Glasfaser, zum Tragen kommen, erlauben aber weder eine allzu enge Lichtführung noch eine gleichzeitige Signalmanipulation. Wird z.B. ein Wellenleiter zu stark gebogen, dann sind die Randbedingungen für die verlustlose Lichtführung in

Angaben zum Projekt

Die beschriebenen Forschungsaktivitäten werden im Rahmen der Forschungsinitiative des Nationalfonds *NCCR Quantum Photonics* und mit der Unterstützung durch zwei Projekte des Nationalfonds und einem KTI-Projekt zusammen mit dem IBM-Forschungslabor, Rüschlikon, durchgeführt. Hierbei ist vor allem die aktive Zusammenarbeit in theoretischen Belangen mit der Computational Optics Group (Prof. Ch. Hafner und Dr. J. Smajic, ETHZ) und bezüglich Charakterisierung und Prozesstechnologie mit den Projektpartnern von der ETH Lausanne (Prof. M. Ilegems, Dr. R. Houdré) zu erwähnen. Wichtige Beiträge entspringen zudem der engen Zusammenarbeit mit der Tbilisi State University (Prof. R. Zaridze, Dr. D. Karkashadze) und der Nano-Optics Group an der ETH Zürich (Prof. V. Sandoghdar, Dr. B. Buchler).

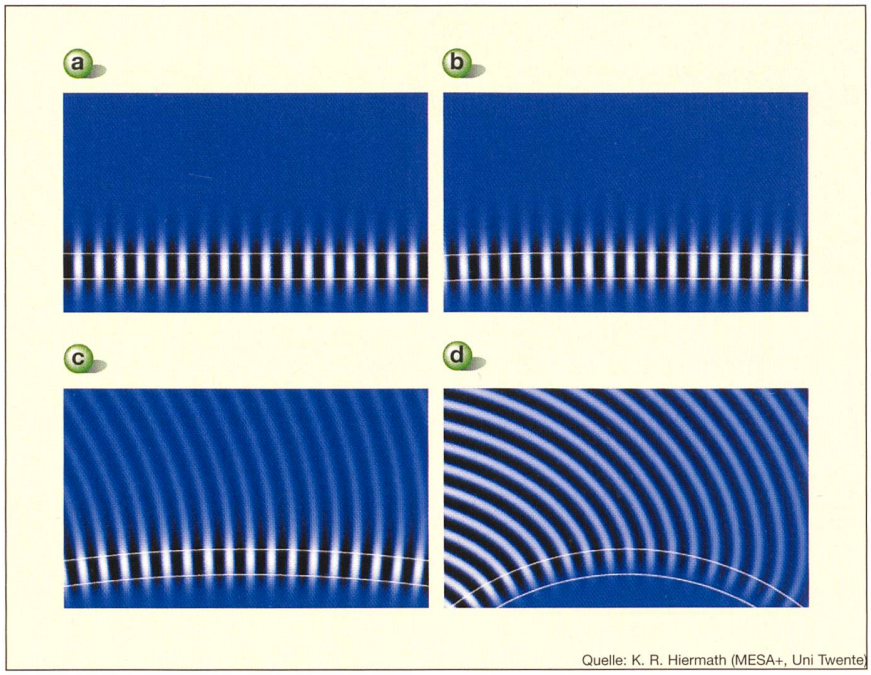


Bild 1 Darstellung des optischen Feldes in zunehmend gekrümmten Filmwellenleiterabschnitten

Die Anregung erfolgt jeweils von links bei einer Wellenlänge von 1,3 µm und für H-Polarisation. Der Kurvenradius nimmt im Uhrzeigersinn entsprechend ab: Bild 1a: R = ∞; Bild 1b: R = 200 µm; Bild 1c: R = 50 µm; Bild 1d: R = 10 µm. Je enger die Wellenleiterkurve, umso schlechter wird das Licht geführt und strahlt seitlich ab.

der Wellenleiterkurve (d.h. die Totalreflexionsbedingung) nicht mehr einzuhalten und das Licht leckt aus. Dieses Phänomen ist in Bild 1 für einen dielektrischen Filmwellenleiter der Breite 1 µm wiedergegeben. Aus Gründen der Anschaulichkeit wurde hier eine übertrieben grosse Brechzahldifferenz zwischen Kern- und Mantelmedium von 0,1 angenommen. Trotzdem ergibt die zugehörige Computersimulation für die Wellenausbreitung entlang der Kurve mit Radius R = 50 µm immer noch einen riesigen Strahlungsverlust von 139 dB/cm. Der Entwurf von Schaltungen für die integrierte Optik beruht – wie der Begriff «Schaltkreis» ja bildlich ausdrückt – im Wesentlichen auf solchen Wellenleiterkurven: Wie könnten die Bausteine auf dem Chip denn ohne Kurven überhaupt miteinander optisch «verdrahtet» werden? Somit gerät der kleinste realisierbare Kurvenradius, der gerade noch eine einwandfreie Lichtleitung zulässt, zum Schlüsselkriterium, wenn es um dichte optische Integration geht.

Wie dicht lassen sich denn hoch miniaturisierte optische Chips überhaupt integrieren? Ein Vergleich mit den elektronischen ICs fällt vernichtend aus: Der «Itanium», der für die kommende 80786-Mikroprozessor-Architektur von Intel und HP steht, enthält etwa 325 Mio. Transistoren, die auf einer Chipfläche von rund 4,2 cm^2 verteilt sind. Das wiederum entspricht einer Integrationsdichte von 77 Mio. Transistoren/cm^2. Ein in der optischen Datenkommunikation gebräuchliches optisches Filter hingegen, das beispielsweise aus 16 Wellenlängenkanälen einen einzelnen Kanal herauszupicken im Stande ist, besteht in der Regel aus 8 resonanten Kopplern. Die Realisierung in einer hoch entwickelten, planaren $SiON/SiO_2$-Glastechnologie (mit einer relativ grossen Brechzahldifferenz von 0,05), welche z.B. auf vergrabenen Rippenwellenleitern basiert, erlaubt Kurvenradien bis hinunter auf 1,5 mm, wodurch sich ein «kompaktes» Schaltungslayout auf einer Chip-Fläche von ungefähr 9 cm^2 unterbringen lässt. Das macht gerade mal 1 Koppler/cm^2.

Licht weist schlechtes Führungsverhalten auf

Diese grosse Diskrepanz hängt mit dem Führungsverhalten von Licht zusammen, das im Vergleich zur Stromleitung im elektronischen Chip dramatisch schlechter ausfällt. Wie vorhin kurz angedeutet wurde, besteht die bislang wirkungsvollste Gegenmassnahme darin, die Brechzahldifferenz zwischen Wellenleiterkern und dem umgebenden Material zu vergrössern. Verwendet man sehr feine, frei stehende, stegförmige Wellenleiter – so genannte «photonische Drähte» – die z.B. aus dem hoch brechenden Halbleitermaterial Galliumarsenid hergestellt sind, dann sind Kurvenradien von 10 µm durchaus möglich. Theoretisch ergibt das eine Integrationsdichte von 100 000 Bausteinen/cm^2, die im Kontext eines komplexen, hoch miniaturisierten optischen Chips aber noch nie verwirklicht wurde. Solchen Packungsdichten haftet gegenwärtig also immer noch der Makel des Unrealistischen an, den die laufende Forschung mit ganz unterschiedlichen Ansätzen aufzuheben versucht. So stellt etwa die Verwendung exotischer Materialien von sehr hoher Brechzahl wie Titanoxid eine mögliche Perspektive dar. Oder man ersetzt Wellenleiterkurven durch einen entsprechend ausgerichteten Mikrospiegel, der das Licht sozusagen um die Ecke spiegelt. Denkbar wäre auch die Erschliessung der dritten Dimension, indem man die räumliche Begrenztheit eines planaren Schaltungslayouts durch vertikale Verbindungskonzepte in mehrlagigen, optischen Chips zu sprengen versucht. Allen hier geschilderten Massnahmen ist aber eines gemeinsam: Sie sind bisweilen den gleichen eingrenzenden Totalreflexionsbedingungen der normalen Lichtleitung unterworfen.

Alternative Lichtleitung in planaren photonischen Kristallen

Aus den bis hierhin gemachten Aussagen geht hervor, dass die Steigerung der Integrationsdichte in photonischen Chips

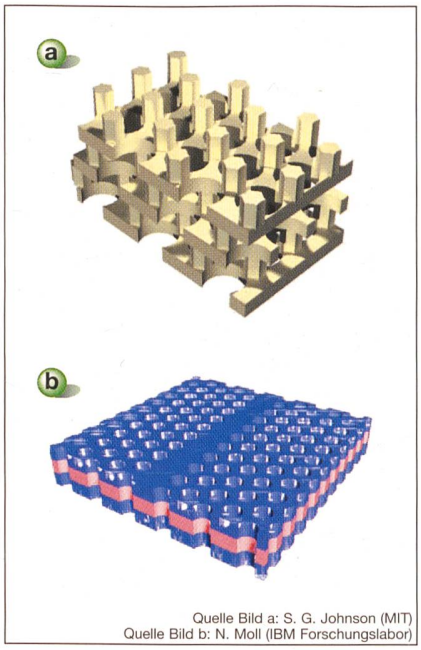


Bild 2 Beispiele unterschiedlicher photonischer Kristalle

Bild a: 3D photonischer Kristall mit kubisch-flächenzentrierter (fcc) Gittersymmetrie. Bild b: Planare photonische Kristallstruktur mit 2D-Dreieckgittersymmetrie und linear ausgeformter Kristalllücke

unweigerlich mit dem erfolgreichen Aufspüren von alternativen, eng führenden Lichtleitungsmechanismen zusammenhängt. Ein etwas anderer Zugang wurde hingegen in einem früheren Beitrag im *Bulletin SEV/VSE* skizziert [1]. Hier lag der Blick auf den periodischen und nichtperiodischen Wellenleitergittern, wo sich das Potenzial für die integrierte Optik vor allem in der Kombination von räumlicher und spektraler «Formgebung» des optischen Feldes orten liess: So bedeutet z.B. die lokale Konzentration des optischen Feldes – bei gleichzeitiger Erzeugung einer erwünschten Filtereigenschaft – einen Zuwachs an Funktionalität, der zudem noch im selben Bauteilvolumen zu Tage tritt. Beide Massnahmen – die enge Lichtführung und die Steigerung der Funktionalität pro Volumeneineinheit – lassen sich überraschenderweise zu einem einheitlichen Integrationskonzept vereinen, das sich auf der Basis von so genannten «photonischen Kristallen» auch wirklich in die Tat umsetzen lässt.

Das attraktive Erbe der Festkörperphysik

Die optische Version eines Festkörperkristalls heisst naheliegenderweise «photonischer Kristall» und bildet nun seit knapp zehn Jahren einen Schwerpunkt intensivster Forschungsaktivitäten[1]. Erste Gestaltungsvorschläge, wie solche raumperiodischen dielektrischen Strukturen im Stil der Festkörpertechnologie für Photonen zu nutzen sind, wurden 1987 zeitgleich und unabhängig voneinander von Eli Yablonovitch [2] und von Sajeev John [3] vorgestellt. Mit diesen beiden Beiträgen fanden wichtige Konzepte wie Bandstruktur, Dotierung und atomare Repräsentation des periodischen Streuproblems Einzug in die Terminologie der angewandten Optik. Die Analogie zur Elektronenbewegung im kristallinen Festkörper – d.h. zur Festkörperphysik – ist daher von unschätzbarem Wert, denn sie erschliesst uns eine schier unendliche Vielfalt an bereits erarbeitetem Apriori-Wissen.

Photonische Kristalle gehören zur Klasse der sog. *Metamaterialien*[2] und treten in der Gestalt von räumlich-periodisch veränderten dielektrischen Materialien auf, wie dies in der allgemeinsten Form beispielsweise in Bild 2a wiedergegeben ist: So stellt der dreidimensionale (3D) photonische Kristall in jeweils einer ausgeprägten Richtung auch eine 1D-periodische Struktur dar, die – ähnlich wie ein *Bragg-Gitter*[3] – Bandsperrecharakter aufweisen kann. Wegen der sich kohärent überlagernden Gitterreflexionen ist bei dieser Wellenlänge keine Wellenausbreitung im Gitter mehr möglich, d.h. die Lichtwelle klingt ab und verschwindet letztlich. Je nach Gitterbeschaffenheit gilt diese Sperrband-Eigenschaft sogar bezüglich allen Raumrichtungen (und allen Polarisationsrichtungen des Lichts), wobei man dann von einem photonischen Kristall mit «vollständiger Bandlücke» spricht. Aus Gründen der Symmetrie ist somit die Lichtausbreitung in solchen Kristall-Anordnungen für einen bestimmten Wellenlängenbereich (d.h. im Sperrband, oder besser: in der Bandlücke) verboten. Umgekehrt ist Licht also überall dort erlaubt, wo die Kristall-Symmetrie gestört wird. Diesen wichtigen Umkehrschluss wollen wir uns nun zu Nutze machen.

Enge Lichtführung im planaren photonischen Kristall

Sowohl elektronische als auch optische integrierte Schaltungen sind in der Regel «schichtartig» aufgebaut. Das hängt unter anderm mit der in der Halbleiterindustrie gebräuchlichen Prozesstechnologie des präzisen Schichtwachstums zusammen. Für den dicht-integrierten photonischen Chip sind daher nur planare Realisierungen von photonischen Kristallen interessant. Bild 2b zeigt eine solche planare photonische Kristallstruktur. Die vertikale Lichtführung beruht hier auf einem gewöhnlichen Filmwellenleiter, dessen Kernmedium (rot) im Vergleich zum Substrat- bzw. Deckmaterial (blau) eine grössere Brechzahl aufweisen muss. Wird der Filmwellenleiter nachträglich mit einer zweidimensionalen (2D) symmetrischen (in diesem Fall: schachbrettartigen) Anordnung von Löchern durchsetzt, dann formt sich der gesuchte, planare photonische Kristall heraus. Die laterale Lichtführung ergibt sich hingegen, indem man den Umkehrschluss beherzigt und eine Reihe von Löchern weglässt. Die dadurch entstehende Lücke wirkt somit als «Lichtkanal», der nun eine Lichtführung innerhalb eines einzigen Gitterabstands erlaubt. Bei der in der Telekommunikation gebräuchlichen Wellenlänge von 1550 nm geschieht dies innerhalb von weniger als einem Tausendstel Millimeter.

Planare photonische Kristalle können unterschiedliche 2D-Gittersymmetrien aufweisen: Bisher wurde von der (schachbrettartigen) Dreieckgittersymmetrie gesprochen, doch wäre auch eine rechteck-symmetrische Gitteranordnung denkbar. Ebenso liesse sich ein «inverser» photonischer Kristall realisieren, bei welchem die Gitterstörung nicht als Lochraster in einem dielektrischen Medium auftritt, sondern als dielektrische Säulenanordnung, die dann sozusagen von Luft umgeben ist. Der säulenartige, planare photonische Kristall ist – ganz im Gegensatz zur Löchervariante – für die dicht integrierte Optik fast ohne Bedeutung, da sich derartige Säulen technologisch nur schwer herstellen lassen und das Licht in dieser Anordnung vertikal schlecht geführt wird. Trotzdem erfreut sich die Säulenvariante einer ungebrochenen Beliebtheit, vor allem weil sie numerisch viel unproblematischer zu berechnen ist als die Löcherstruktur und sich daher für die Evaluation ganzer Bauteiltopologien, d.h. insbesondere für konzeptionelle Studien [4] sehr gut eignet. Bild 3 zeigt eine solche «generische

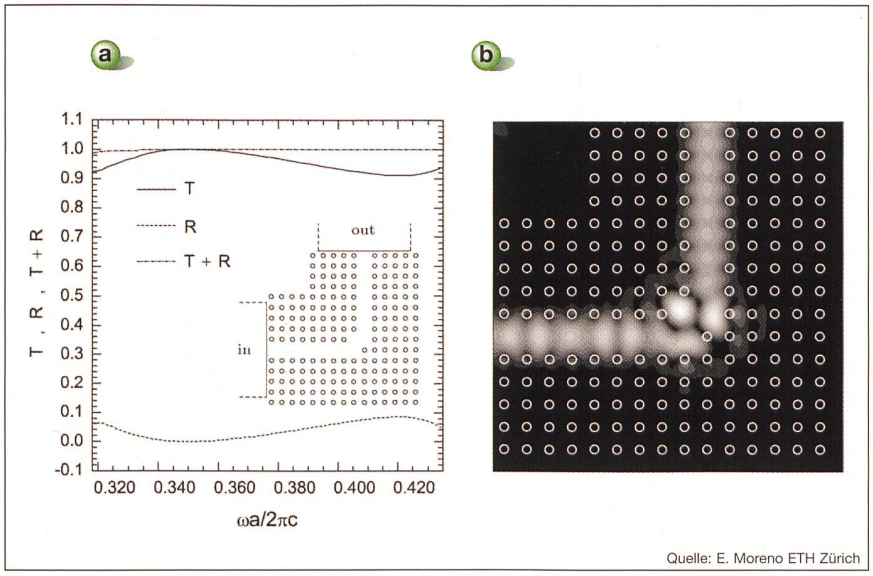


Bild 3 Aufsicht auf die 90°-Kurve

Die Anregung erfolgt jeweils von links mittels einer E-polarisierten Welle. Bild a: Leistungstransmission T und -reflexion R. Bild b: Darstellung des zeitlich gemittelten elektrischen Feldes.

Struktur»: Das 2D-Rechteckgitter besteht hier aus einer Vielzahl von runden dielektrischen Zylindern, je mit einem mit Radius von $r = 0{,}18 \cdot a$ (a ist die Gitterperiode) und $\varepsilon_r = 11{,}56$. Die 90°-Kurve setzt sich aus zwei normal aufeinander zu laufenden Kristalllücken zusammen, und das elektromagnetische Feld wurde bei einer normierten Frequenz (innerhalb der Bandlücke) von $\omega \cdot a/(2\pi \cdot c) = 0{,}435$ mit Hilfe der *MMP-Methode*[4)] in 2D simuliert [5].

Die im Bild 3 dargestellte 90°-Wellenleiterkurve soll exemplarisch aufzeigen, dass die alternative Lichtführung, welche auf der Wellenleitung entlang von Defekten in photonischen Kristallen beruht, über eine grosse Bandbreite äusserst effizient funktioniert: Verglichen mit der konventionellen Filmwellenleiterkurve aus Bild 1 wird das Licht in dieser alternativen 2D-Struktur mit einem Wirkungsgrad, der stets über 90% liegt, um «scharfe Ecken» geleitet.

Bauelemente aus planaren photonischen Kristallen

Lassen sich auf der Basis von derart exotischen Wellenleitungsmechanismen überhaupt hoch-miniaturisierte optische Chips realisieren? Oder: Ist dieses Wellenführungsschema flexibel genug, um damit funktionale Bauelemente nach technischen Vorgaben entwerfen zu können? Wir glauben, dass wir diese Fragen, wie in den folgenden Abschnitten am Beispiel einer extrem kompakten Filterstruktur (einer winzigen «Lichtweiche») noch ausgeführt wird, bejahend beantworten können.

Lichtweiche: rot nach rechts, blau nach links

Die «Lichtweiche» besteht aus drei T-förmig angeordneten «Lichtkanälen» (Bild 4). Um die Studien an dieser photonischen Kristalltopologie möglichst einfach zu gestalten, wurde hier die gleiche «generische Struktur» wie vorhin angenommen, d.h. ein 2D-Rechteckgitter, bestehend aus einer Vielzahl von runden, dielektrischen Säulen. Bevor man sich aber der «Lichtweiche» zuwendet, gilt es den maximal zulässigen Arbeitsbereich für dieses zugrunde liegende photonische 2D-Rechteckgitter (und somit auch für die «Lichtweiche») festzustellen, indem man das genaue Wellenlängenintervall der Bandlücke mit Hilfe von so genannten *Bandstrukturrechnungen*[5)] [6, 7] ermittelt. Die Funktionsweise der T-förmigen Lichtweiche ist einfach: Sie spaltet das einfallende Licht in zwei, leicht unterschiedliche Farbanteile (also in zwei

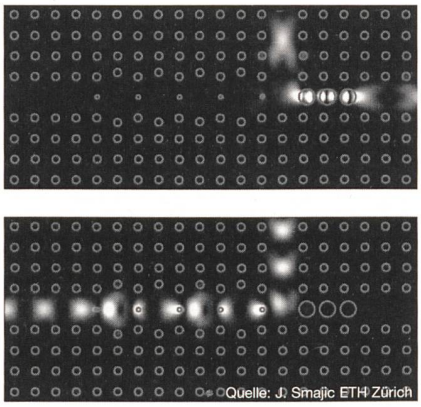


Bild 4 Schematische Aufsicht auf die «Lichtweiche» mit einem Vergrösserungsfaktor von ungefähr 4700

Der planare photonische Kristall ist durch Säulen (runde Kreise) dargestellt. Die Lichtleistung wird jeweils von oben als E-polarisierte Welle eingespeist und bei grösseren Wellenlängen zu 93% nach rechts (oberes Bild), bzw. bei entsprechend kleineren Wellenlängen zu 91% nach links (unteres Bild) abgezweigt.

Anteile unterschiedlicher Wellenlänge) auf. Wie beim optischen Filter bereits angetönt, stellt diese Aufspaltung eine wesentliche Grundoperation in modernen optischen Datenkommunikationsnetzen dar, wo mehrere parallel laufende Datenströme mit Hilfe von Licht bei entsprechend zugeordneten Wellenlängen im Infrarotbereich übertragen werden. Die T-förmige Lichtweiche sorgt nun dafür, dass der eine Datenstrom nach links und der andere Datenstrom nach rechts abgezweigt wird. Im optischen Chip, der auf einem planaren photonischen Kristall beruht, geschieht dies auf engstem Raum.

Dem Licht die Geschwindigkeit vorschreiben

Der einfache Trick der Entwurfsmethode besteht im Wesentlichen darin, die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lichtimpulse im Eingangskanal bei einer vorgegebenen Wellenlänge an die Ausbreitungsgeschwindigkeit im entsprechenden Ausgangskanal anzupassen. Dadurch lässt sich der Leistungsfluss nach links bzw. nach rechts optimieren. Da die Richtungen der Abzweigung je einer unterschiedlichen Wellenlänge zugeordnet sind, unterscheidet sich der linke vom rechten Ausgangskanal auch in seiner Gestalt: Je nach Struktur der Säulen in der Abzweigung wird ein bestimmtes Dispersionsverhalten vorgegeben und so eine entsprechende Wellenlänge favorisiert. Die Hauptlast der Forschungsarbeit besteht nun darin, mit Hilfe umfangreicher Computersimulationen geeignete Kandidaten für solche «Lichtkanäle» zu ermitteln. Dass die Suche bis anhin erfolgreich verlaufen ist, zeigt Folgendes: Mit ihren Abmessungen von 7,5 × 5 Tausendstel Millimetern ist dies eine der kleinsten, effizient funktionierenden Lichtweichen überhaupt [8].

Strukturoptimierung als einzige Entwurfsmethodik

Nimmt man die «Lichtweiche» als Massstab für die optische Integration, dann liegt eine Packungsdichte von zwei Millionen Bausteine/cm^2 bereits in Griffweite. Selbst wenn dieser Wert, der um einen Faktor 40 unter der Integrationsdichte der Elektronik liegt, erreicht würde, ist immer noch offen, ob sich derart kompakte Bauelemente überhaupt an die strengen Spezifikationen der optischen Datenkommunikation anpassen lassen. Abgesehen vom flächenoptimalen Schaltungsentwurf ist es vor allem die «rasterartige» Natur des planaren photonischen Kristalls, die den Entwurf von optischen Bauelementen so schwierig macht: Lichtkanäle in der Gestalt von Kristalllücken können sich z.B. nur entlang von diskreten Gitterpunkten erstrecken, d.h. alle Formgebungsoperationen müssen sich zwingend an der 2D-Gittersymmetrie orientieren.

Wie völlig unberechenbar ein photonisches Kristallbauelement auf solch eingeschränkte Formgebung «reagieren» kann, lässt sich übrigens sehr schön anhand eines Java-Applets für einen Leistungsteiler selber nachvollziehen [9]. Eine prinzipielle Frage steht dabei immer im Raum: Ist das Grundraster, welches durch das 2D-Gitter vorgegeben wird, überhaupt fein genug, um funktionale Bauelemente wie z.B. optische Filter nach beliebigen technischen Vorgaben entwerfen zu können? Die Antwort liegt einzig in der numerischen Strukturoptimierung. Ausgehend vom eher rezeptartigen Vorgehen beim Entwurf der Lichtweiche können nun verschiedene Vorgehensweisen skizziert werden. Die Nächstliegende trägt dem Gittercharakter am ehesten Rechnung, indem ein Optimierungsalgorithmus lediglich zu entscheiden hat, ob die Gitterstelle an einem bestimmten Ort nun als normales Gitterelement (Säule oder Loch als «Gitteratom») oder als Defekt (fehlendes «Gitteratom») auszugestalten ist. Ein solches *kombinatorisches* Optimierungsproblem lässt sich gut mittels *genetischen* (oder *evolutionären*) *Algorithmen* [1] lösen. Vorversuche an der besagten Wellenleiterverzweigung [9] haben ergeben, dass eine möglichst breitbandige, verlustlose und symmetrische Leistungsaufteilung selbst bei kleinsten Bauteilvolumen (4×5 Gitterperioden) machbar ist. Ein etwas anderes Vorgehen

wird in [10] skizziert: Im Rahmen einer *Sensitivitätsanalyse* wurden die Durchmesser von 10 Säulen in der unmittelbaren «Ecke» der 90°-Kurve aus Bild 3 jeweils leicht vergrössert bzw. verkleinert. Anhand der individuellen Wirkung auf das gesamte Übertragungsverhalten der 90°-Kurve konnte so eine optimale Konfiguration von Säulendurchmessern extrapoliert werden, die eine 99-prozentige Leistungstransmission praktisch über den gesamten Wellenlängenbereich der Bandlücke garantiert. Das Vorgehen lässt sich dahingehend erweitern, dass auch die *Positionen* der entsprechenden Säulen zur Disposition stehen und die Sensitivitätsanalyse im Sinne eines *numerischen Gradientensuchverfahrens* ausgebaut wird. Gegenwärtig sind Optimierungsverfahren im Einsatz, die simultan Grösse und Position von Gitterelementen/Defekten variieren. Zu diesem Zweck werden verschiedene *Suchheuristiken* untersucht und dies im Hinblick auf die Optimierung von photonischen Kristallbauelementen wie Taperstrukturen[6] für die effiziente Leistungseinkopplung von konventionellen Wellenleitern in die engen Lichtkanäle des photonischen Chips, wie breitbandige Wellenleiterkurven, unterschiedlich dispersive Defektwellenleiter, Leistungsteiler, Antennen, kompakte Resonatoren hoher Güte, Filter und mehrkanalige Multiplexer. Ob sich überhaupt optimale Schaltungskonzepte finden lassen, ist immer noch unklar und bleibt somit das zentrale Erfolgskriterium unserer gegenwärtigen Forschung.

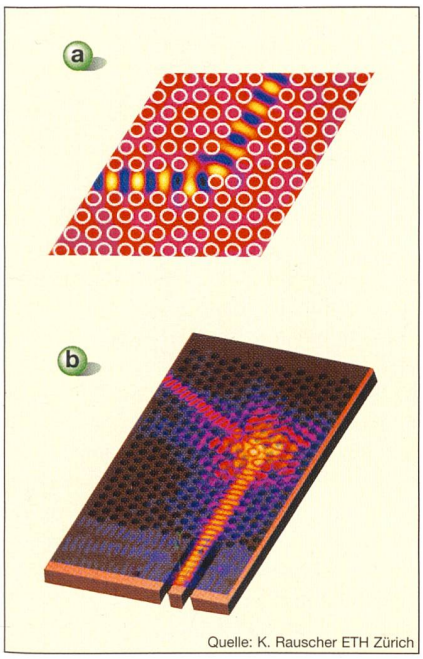


Bild 5 Simulationen des H_z-Feldes in einer optimierten 60°-Kurve

Die Anregung erfolgt jeweils von links bzw. von unten mittels einer H-polarisierten Welle. Bild a: Die 2D-Simulation ergibt eine Leistungstransmission von 96%. Bild b: Die realistische 3D-Simulation ergibt hingegen nur einen entsprechenden Wert von 66% (entspricht 1,8 dB/Kurve).

Verifikation mittels 3D-Simulationen

Bis anhin wurde implizit angenommen, dass alle Konzeptstudien hin zu viel versprechenden Schaltungstopologien in photonischen Kristallen jeweils mit Hilfe von numerischen 2D-Simulationswerkzeugen durchzuführen sind. Das liegt vor allem im numerischen Rechenaufwand begründet: 2D-Strukturen sind – wegen der fehlenden dritten Dimension – entsprechend einfach zu repräsentieren und benötigen auf einem schnellen 2,7 GHz-PC mit 2 GB RAM Rechenzeiten, die je nach Komplexität des Bauelements typischerweise von Sekunden bis knapp über eine Stunde reichen. Bei 3D-photonischen Kristallstrukturen ist hingegen meistens mit Simulationszeiten von 2 bis 20 Stunden zu rechnen, was ein Optimierungsszenario gänzlich ausserhalb des Möglichen rückt. 3D-Simulationen dienen somit lediglich der *Verifikation* von Bauelementen, deren Topologien vorgängig mittels 2D-Konzeptstudien gefunden werden müssen. Ist die dabei vorausgesetzte Übersetzbarkeit der Problemstellung von 2D nach 3D überhaupt statthaft? Man denke doch nur einmal an das nach oben und unten weggestreute Licht in einer realen (3D-)photonischen Kristallstruktur, wie sie z.B. in Bild 2b dargestellt ist. Dieser unerwünschte Verlustmechanismus (out-of-plane loss) kann mit einem 2D-Modell eigentlich gar nicht direkt erfasst werden. Für reale planare photonische Kristalle (d.h. für die Löchervariante mit einer 2D-Dreieckgittersymmetrie) wurde kürzlich ein gangbarer Mittelweg vorgeschlagen. Im Rahmen eines *phänomenologischen 2D-Modell* lässt sich die vertikale Abstrahlung (out-of-plane loss) nämlich als entsprechender Verlustfaktor den Löchern zuordnen. Die Abbildung der vertikalen Abstrahlungsverluste in das einfache 2D-Modell beruht auf einer Störungsrechnung und wurde in [11] erheblich weiter entwickelt: Sie berücksichtigt sogar die spezifische Form des Lochs (Zylinder, Konus oder Kombinationen davon) und kann – was wesentlich wichtiger ist – auch messtechnisch nachvollzogen werden. Dass Verlustmechanismen in planaren photonischen Kristallen immer noch ein heiss diskutiertes Forschungsthema abgeben, zeigen unter anderem auch die im Bild 5 dargestellten Vergleichssimulationen. Im Sinne unseres Vorgehens wurde hier eine 60°-Wellenleiterkurve mittels der 2D-Feldberechnungsmethode MMP opti-

miert und nachträglich als realistische 3D-Struktur mit Hilfe der leistungsfähigen 3D-Simulationsplattform SEMCAD [12], die auf dem Finite-Differenzen-Zeitbereichs-Verfahren (FDTD) beruht, evaluiert. Die Diskrepanz bezüglich der Leistungsübertragung ist mit einem Wert von 30% erheblich, und kann nicht mit den vorhin angesprochenen allgemeinen Abstrahlverlusten alleine erklärt werden. Die Feldverteilung in der 3D Struktur aus Bild 5b zeigt deutlich, dass in der unmittelbaren Umgebung der Kurve zusätzliche, *lokale* Abstrahlmechanismen wirksam sind. Selbst wenn man die vertikale Lichtführung durch einen vergrösserten Brechzahlunterschied zwischen Kern- und Deck- bzw. Substratmaterial noch verstärken würde, blieben die *lokalen* Abstrahlverluste in der Kurve bestehen, denn sie resultieren letztlich aus einer *Symmetriebrechung* bezüglich der Gestalt des Lichtkanals. Es gilt nun, das *phänomenologische 2D-Modell* diesen Verhältnissen im Wellenleiterknick anzupassen, damit die 2D-Konzeptstudien vertrauenswürdig bleiben.

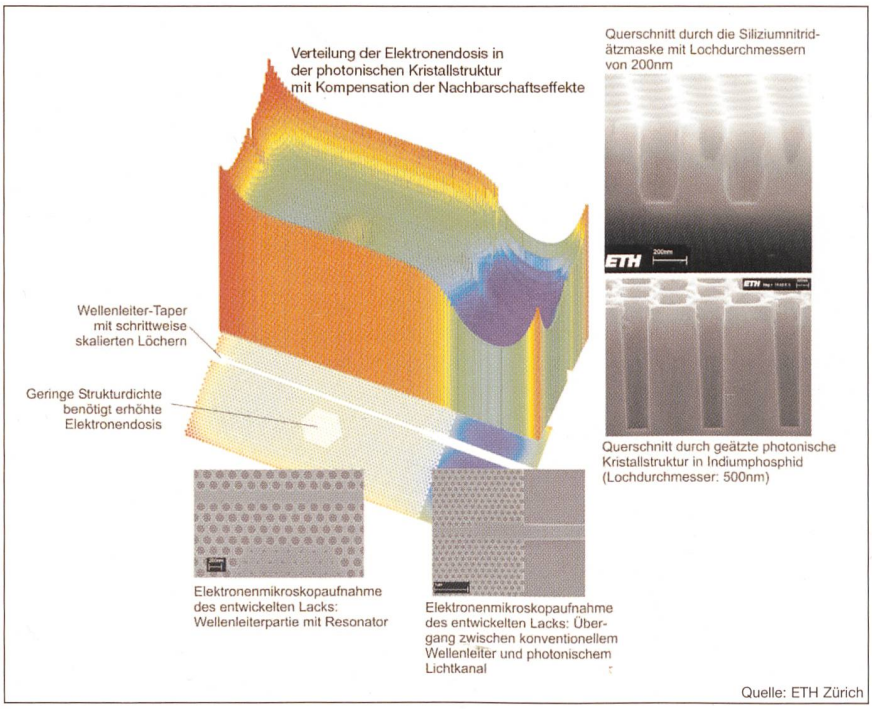


Bild 6 Visualisierung der relevanten Prozessschritte am Beispiel einer «generischen», planaren photonischen Kristallstruktur

Zur Prozesstechnologie planarer photonischer Kristalle

So viel versprechend die Möglichkeiten der photonischen Kristalle sind, so anspruchsvoll ist ihre Herstellungstechnologie, wenn wir die gefundenen Schaltungskonzepte z.B. in Indiumphosphid[7)] realisieren wollen: Beträgt die Lichtwellenlänge im Freiraum 1,55 µm, wird sie im photonischen Kristall durch die Brechzahl des Halbleitermaterials auf ungefähr 450 nm verkürzt. Die Lochdurchmesser und Lochabstände haben demnach Abmessungen von typischerweise 200 nm bzw. 300 nm und dies bei einer angestrebten Lochtiefe von etwa 3 µm. Damit die Funktionsweise des photonischen Bauelements erhalten bleibt, dürfen die Werte der Lochdurchmesser und der Lochpositionen nicht mehr als 5 nm streuen. Ein Blick auf Bild 6 dramatisiert diese nanotechnologische Herausforderung noch zusätzlich: Tausende von idealerweise zylindrischen Löchern müssen mit Nanometer-Präzision durch ein Trockenätzverfahren (ICP-RIE[8)]) in das InP-Material (das Deck- und Substratmaterial des Filmwellenleiters) und die dazwischenliegende InGaAsP-Schicht (der Wellenleiterkern) geätzt werden.

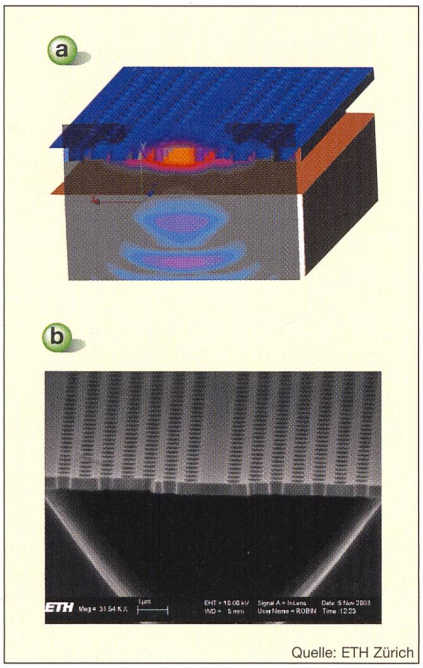
Die vorgängige Maskierung für den Trockenätzprozess erfolgt zweistufig: In einem ersten Schritt wird das Layout der photonischen Kristallstruktur unter Einsatz einer Elektronenstrahllithografie-Anlage in eine «elektronenempfindliche», 200 nm dicke Lackschicht geschrieben. Um der Fehlbelichtung, hervorgerufen durch die unerwünschte Elektronenrückstreuung, entgegen zu wirken, muss das Belichtungsprofil entsprechend vorverzerrt werden [13]: Bild 6 zeigt eine derart numerisch korrigierte Dosisverteilung, dank welcher die geforderte Auflösung und Genauigkeit überhaupt erst erreicht werden kann [14]. Im zweiten Schritt gilt es das im Lack enthaltene Bild der photonischen Kristallstruktur in die darunter liegende 400 nm dicke SiN_x-Maske zu transferieren. Es liegt vor allem an der Widerstandsfähigkeit dieser zweiten Maske, dass der nachfolgende ICP-RIE-Trockenätzprozess auch für tiefe Löcher erfolgreich verläuft [15]. Dieser sicher etwas knappe Überblick über die Prozessschritte bei der Herstellung photonischer Kristallstrukturen soll vor allem eines hervorheben: Wegen ihrer charakteristischen Gestalt – damit gemeint sind vor allem die grosse Dynamik in der Strukturdichte und die sehr kleinen Lage- und Formtoleranzen – definiert die Prozesstechnologie ein eigenständiges Untersuchungsfeld, welches an der ETH wiederum sehr intensiv beforscht wird.

Ausblick

Bis hierhin wurde eigentlich eine recht viel versprechende Geschichte erzählt, was den Einsatz von planaren photonischen Kristallstrukturen in der dicht integrierten Optik angeht. Doch nur die Fakten zählen: Wie überzeugend verhalten sich die auf dieser Grundlage gefertigten photonischen Bauelemente?

Real existierende Wellenleiterstrukturen

Nimmt man den geradlinigen W1-Defektwellenleiter – d.h. die Kristalllücke von der Breite einer Gitterkonstante – als Beispiel, dann ist mit Wellenleiterverlusten von über 100 dB/cm zu rechnen. Diese Zahl gilt für schwache vertikale Lichtführung wie das z.B. bei einer InP-Realisierung der Fall ist (man spricht hier vom «Substrat-Typ» eines planaren photonischen Kristalls), und muss zudem ins Verhältnis zur extrem kleinen Bauteildimension (wenige µm) gesetzt werden. Die vertikalen Abstrahlverluste (out-of-plane loss) lassen sich deutlich verringern, indem man den Brechzahlunterschied zwischen Kern- und Deck- bzw. Substratmaterial vergrössert. Bild 7 zeigt eine photonische Kristallmembrane, die diesen Anforderungen entspricht. Solche «Membran-Typen» planarer photonischer W1-Kristallwellenleiter können auch in einer $SiO_2/Si/SiO_2$-Schichtkombination (sprich: SOI) realisiert werden und erreichen rekordverdächtige Dämpfungswerte von typischerweise 50 dB/cm bis hinunter auf 17 dB/cm. Trotz dieser guten Werte müssen wir uns bewusst



Quelle: ETH Zürich

Bild 7 Photonische Kristallmembrane mit Defektwellenleiter

Bild a: 3D-FDTD-Simulation des Hz-Feldes bei Anregung mit einer H-polarisierten Welle von vorn.
Bild b: Rasterelektronenmikroskopaufnahme der freistehenden, 434 nm dicken Membrane aus InGaAsP.

sein, dass die hierbei verstärkte Konzentration des Lichts im Kernmaterial stets einen weiteren Verlustmechanismus mobilisiert, nämlich die Lichtstreuung an den rauen Loch-Wänden. Verlustoptimierung heisst somit, die optimale Balance zwischen den beiden Mechanismen halten.

Wegen der einfachen Ankopplung von aussen, kommen in der Praxis eher die breiten W3-Defektwellenleiter (dreimal so breite Kristalllücke) zum Einsatz. Hier erreicht der Substrat-Typ Verlustwerte von 110–200 dB/cm und die SOI-Membran-Realisierung erwartungsgemäss 25–40 dB/cm. Dass die angegebenen Werte eher weit gefasst sind, hat mit der Mehrwelligkeit der W3-Defektwellenleiter zu tun: die inhärente Modenkopplung macht die genaue Verlustbestimmung sehr kontextabhängig. Bei der 60°-Wellenleiterkurve, die in unserer Argumentation hin zu einer dicht integrierten Optik eine zentrale Rolle spielt, dominieren vor allem die *lokalen* Abstrahlmechanismen in der Eckzone. Hieraus resultiert für den besten, bisher dokumentierten Fall einer W1-Substrat-Typ-Realisierung ein Verlust von 1,5 dB/Kurve, was 0,3 dB unter dem Wert der in Bild 5b simulierten Struktur liegt. Vergleichbare W3-Kurven weisen typischerweise Einfügungsdämpfungen von 1,1–3 dB/Kurve auf.

Welche Schlüsselanwendungen sind denkbar?

Im Hinblick auf den dicht integrierten photonischen Chip können die realisierten Defektwellenleiter bereits mit recht ansprechenden Leistungen aufwarten. Trotzdem: Reicht die alleinige Rede um dichte optische Integration aus, um die alternative Technologie der planaren photonischen Kristalle rechtfertigen zu können? Zwei kritische Fragen wurden kürzlich von einem Vertreter eines bekannten Risikokapitalunternehmens gleich nachgeschoben. Was können photonische Kristalle prinzipiell besser als die konventionelle Wellenleitertechnik? Und: Gibt es überzeugende Schlüsselapplikationen, die sich ausschliesslich des Prinzips der photonischen Kristalle bedienen? Unsere Antwort muss differenziert ausfallen. Ja, es gibt zumindest eine Schlüsselanwendung, die es bereits zur Marktreife gebracht hat. Es ist dies die mikrostrukturierte Glasfasern, deren Querschnittgeometrie nach dem Prinzip eines photonischen Kristalls ausgestaltet ist. Damit lassen sich grosse Lichtleistungen übertragen, wobei die starke Konzentration des Lichts im Faserkern nichtlineare Prozesse wie z.B. die Selbstphasenmodulation anregen kann, was wiederum zur Erzeugung von weissem Licht ausgenutzt wird. Eine andere Schlüsselanwendung stellen die Mikrokavitäten höchster Güte dar. Dieser ultrakompakte, auf einem photonischen Kristalldefekt basierende planare Resonator kann Güten Q von üblicherweise 100 bis hin zu 45 000 aufweisen. Letztere Struktur wurde in einer freistehenden Siliziummembrane realisiert und hat ein Volumen V von lediglich $7 \cdot 10^{-14}$ cm^3, wobei ein Q/V-Verhältnis resultiert, das 100-mal grösser ist, als bei allen bisher vergleichbaren Resonatoren [16]. Beide Anwendungen zeigen eine Tendenz auf, die sich gerade für photonische Kristalle als zukunftsweisend herausstellen wird: Dank der starken Lichtkonzentration können nichtlineare oder komplexe Materialeigenschaften (anisotrop, bi-isotrop, chiral oder aktiv) [17] besser zur Geltung gebracht werden und dadurch ganz neue Bauteile hervorbringen, wie z.B. ultrakompakte voll-optische Lichtschalter, optische Isolatoren oder nanoskopische Laser. Bisher war es vor allem der starken Wechselwirkung der Elektronen zu verdanken, die digitale Logik in der Elektronik ermöglicht zu haben. Die äusserst schwach wechselwirkenden Photonen wurden lediglich zum Signaltransport eingesetzt. Mit der Möglichkeit, Photonen in photonischen Kristallstrukturen mit komplexen Materialien stark wechselwirken zu lassen, rückt die Vision einer ultra-schnellen «digitalen Optik» in denkbare Reichweite. Zurück zur kritischen Frage: Was die photonischen Kristalle so einzigartig macht, ist die Möglichkeit der simultanen räumlichen und spektralen Ausformung des Lichtfeldes unter Einbezug komplexer Materialeigenschaften. Sobald wir diese Gestaltungsmöglichkeiten gezielt zu nutzen verstehen, werden optische Bauelemente von noch nie gekannter Leistungsfähigkeit in unsere technische Welt treten und Zeugnis über ein Forschungsgebiet ablegen, das bereits heute zu den Interessantesten gehört. Das hoffen wir jedenfalls.

Referenzen

[1] *D. Erni:* Nichtperiodische Konzepte in integrierten optischen Wellenleiterstrukturen. Bulletin SEV/VSE, Vol. 88, No. 3, pp. 11–16, 1997.

[2] *E. Yablonovitch:* Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Physical Review Letters, Vol. 58, No. 20, pp. 2059–2062, 1987.

[3] *S. John:* Strong localization of photonis in certain disordered dielectric superlattices. Physical Review Letters, Vol. 58, No. 23, pp. 2486–2489, 1987.

[4] *E. Moreno, D. Erni, C. Hafner:* Modeling of discontinuities in photonic crystal waveguides with the multiple multipole method. Physical Review E, Vol. 66, No. 3, pp. 036618/1–12, 2002.

[5] *Ch. Hafner:* Post-modern Electromagnetics – Using Intelligent Maxwell Solvers. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1999.

[6] *J. Smajic, Ch. Hafner, D. Erni:* Automatic calculation of band diagrams of photonic crystals using the multiple multipole program. ACES Journal, Vol. 18, No. 3, pp. 172–180. 2003.

[7] *E. Moreno, D. Erni, C. Hafner:* Band structure computations of metallic photonic crystals with the multiple multipole method. Physical Review B, Vol. 65, No. 15, pp. 155120/1–10, 2002.

[8] *J. Smajic, Ch. Hafner, D. Erni:* On the design of photonic crystal multiplexers. Optics Express, Vol. 11, No. 6, pp. 566–571, 2003.

[9] *J. Smajic:* Java-Applet für den selbstständigen Entwurf eines optimalen Leistungsteilers: http://alphard.ethz.ch/MetaMaterials/PowerDivider/divider.htm

[10] *J. Smajic, Ch. Hafner, D. Erni:* Design and optimization of an achromatic photonic crystal bend. Optics Express, Vol. 11, No. 12, pp. 1378–1384, 2003.

[11] *R. Ferrini, R. Houdré, H. Benisty, M. Qiu, J. Moosburger:* Radiation losses in planar photonic crystals: two-dimensional representation of hole depth and shape by an imaginary dielectric constant. Journal of the Optical Society of America B, Vol. 20, No. 3, pp. 469–478, 2003.

[12] Weitere Informationen zur leistungsfähigen 3D-FDTD-Simulationsplattform «SEMCAD» sind unter www.semcad.com einzusehen.

[13] *R. Wüest, P. Strasser, M. Jungo, F. Robin, D. Erni, H. Jäckel:* An efficient proximity-effect correction method for electron-beam patterning of photonic-crystal devices. Microelectronics Engineering, Vol. 67–68, pp. 182–188, 2003.

[14] *R. Wüest, C. Hunziker, F. Robin, P. Strasser, D. Erni, H. Jäckel:* Limitations of proximity-effect correction for electron-beam patterning of photonic crystals. Proceedings SPIE Vol. 5277, 2003.

[15] *P. Strasser, R. Wüest, F. Robin, D. Erni, H. Jäckel:* Deep dry etching of InP with a $Cl_2/CH_4/H_2$ mixture on an ICP-RIE for photonic crystals. 27th Work-

shop on Compound Semiconductor Devices & Integrated Circuits held in Europe, May 26–28, Fürigen, Switzerland, pp. 81–82, 2003.
[16] *Y. Akahane, T. Asano, B.-S. Song, S. Noda:* High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal. Nature, Vol. 425, pp. 944–947, 2003.
[17] *D. Karkashadze, F. G. Bogdanov, R. Zaridze, A. Bijamov, Ch. Hafner, D. Erni:* Simulation of finite photonic crystals made of biisotropic or chiral material using the method of auxiliary sources. In Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials. S. Zouhdi, A. Sihvola, and M. Arsalane (Eds.), NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry – Vol. 89, pp. 175–193, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.

Angaben zu den Autoren

Dr. ***Daniel Erni*** und Dr. ***Franck Robin*** sind Leiter der *Communication Photonics Group*, die sowohl am Institut für Feldtheorie und Höchstfrequenztechnik (Prof. W. Bächtold) als auch am Institut für Elektronik (Prof. H. Jäckel) der ETH Zürich angesiedelt ist. Die gegenwärtigen Aktivitäten dieser Forschungsgruppe umfassen u.a. numerische Berechnungsmethoden elektromagnetischer bzw. optischer Felder, moderne Ansätze der Strukturoptimierung für den Entwurf photonischer Bauelemente (z.B. Filter und Modenkonverter), Komponenten der Optoelektronik wie Halbleiterverstärker, modengekoppelte Halbleiterlaser, VCSEL und organische Bandkanten-Laser, ultraschnelle, voll-optische Intersubband-Schalter (< 1ps), Systeme für optische Intersatelliten-Links bzw. für die optische Hochleistungs-Datenkommunikation (im Zeitmultiplex bis 160 Gb/s) und neue Konzepte der dicht integrierten Optik (letztere Punkte im Hinblick auf die Terabit-Photonik). Zudem werden auch Problemstellungen aus der Grundlagenforschung wie die kohärente THz-Übergangsstrahlung bei Elektronen-Streuexperimenten am Linearbeschleuniger des neuen Synchrotrons (SLS) im PSI untersucht und auch das Verhalten von verschränkten Bi-Photonen beim Plasmonen-assistierten Durchgang durch dünne, perforierte Metallfilme. Weitere Informationen sind unter www.photonics.ee.ethz.ch zugänglich. Daniel Erni betreut vor allem die theoretischen Forschungsaspekte der Gruppe wie die Analyse, Modellierung und Optimierung photonischer Komponenten und Systeme. Franck Robin beschäftigt sich u.a. mit den Grenzen der hochauflösenden Elektronenstrahllithografie und leitet die Aktivitäten der Prozesstechnologie-Entwicklung (InP, InGaAsP), die am FIRST-Labor der ETH Zürich ausgeführt werden.
Institut für Feldtheorie und Höchstfrequenztechnik, ETH Zürich, Gloriastrasse 35, CH-8092 Zürich
erni@photonics.ee.ethz.ch,
robin@photonics.ee. ethz.ch

[1] Per Ende 2003 wird die Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen, die sich im engeren Sinne mit dem Thema «Photonische Kristalle» befassen, auf etwa 1250 geschätzt. Hingegen verweisen doppelt so viele Publikationen in ihren Ausführungen auf das Konzept der photonischen Kristalle. Als Wachstumsrate wird eine Verdopplung der Anzahl Artikel alle zwei Jahre angegeben. Zum Vergleich ein Verweis auf das riesige Gebiet der «Nanotechnologie»: Hier werden gegenwärtig etwa 12 000 Artikel/Jahr publiziert.

[2] «Metamaterialien» sind künstliche Materialien, deren charakteristische Eigenschaften nicht auf natürlichen Atomen beruhen, sondern auf künstlich geformten (makroskopischen) Grundstrukturen. Metamaterialien können daher Eigenschaften aufweisen, die es in der Natur so nicht gibt.

[3] Beim Bragg-Gitter tritt eine resonante Wechselwirkung zwischen hinlaufender und reflektierter Lichtwelle auf. Im Falle eines Bragg-Gitters erster Ordnung (erste Resonanz) hat die Gitterperiode genau die Abmessung der halben Lichtwellenlänge im Wellenleiter. Diese Beziehung gilt grössenordnungsmässig auch für photonische Kristalle.

[4] «MMP-Methode» steht für die Mehrfach-Multipol-Methode. Dieses äusserst genaue, semi-analytische Feldberechnungsverfahren wurde an der ETH Zürich entwickelt ([5]) und beruht auf den analytischen Basislösungen bezüglich der gegebenen Problemdimension: zylindrische Multipolentwicklungen für 2D bzw. sphärische Multipolentwicklungen für 3D. Die resultierende Feldverteilung wird mit Hilfe einer «geeigneten Anordnung» solcher Multipolentwicklungen approximiert. Die Entwicklungskoeffizienten der resultierenden Feldlösung werden ermittelt, indem man die Grenzbedingungen in diskreten Punkten auf den Rändern der Problemgeometrie erzwingt. Im Gegensatz zu Zeitbereichsmethoden wie z.B. FDTD, arbeitet MMP im Frequenzbereich.

[5] Unter «Bandstrukturrechnungen» versteht man hier die numerische Ermittlung der Dispersionsrelationen (bzw. des Banddiagramms) für Photonen in einer periodischen Struktur. Die Berechnung erfolgt anhand der primitiven (Einheits-)Zelle des Gitters und erfordert die Lösung dieses speziellen Eigenwertproblems.

[6] Mit «Taper» bezeichnet man ein Anpassglied, das einen allmählichen, und dadurch reflexionsfreien Übergang zwischen zwei verschiedenartigen Wellenleitern herstellt.

[7] Indiumphosphid (InP) ist ein gebräuchliches Halbleitermaterial der integrierten Optik und der Optoelektronik.

[8] ICP: Inductive Coupled Plasma; RIE: Reactive Ion Etching (reaktives Ionenätzen).

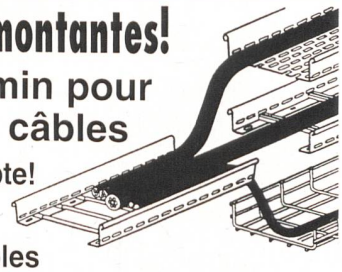
Le cristal photonique planaire comme fluide de transmission étroite de la lumière dans les puces

Composants à base de cristaux photoniques planaires

Jusqu'où peut-on pousser la compacité dans le traitement des signaux optiques en optique intégrée? Cette question est de plus en plus cruciale dans la communication optique moderne des données. Des densités semblables à celles des puces électroniques ne seront cependant possibles que si l'on peut trouver de nouveaux moyens de guidage de la lumière.

Finis les chemins à grille, les chemins de câbles et les **conduites montantes!**

Il existe maintenant les Multi-chemins LANZ: un chemin pour tous les câbles



- **Les Multi-chemins LANZ simplifient la planification, le métré et le décompte!**
- **Ils diminuent les frais d'agencement, d'entreposage et de montage!**
- **Ils assurent de meilleurs profits aux clients: excellente aération des câbles**
- **Modification d'affectation en tout temps. Avantageux. Conformes aux normes CE et SN SEV 1000/3.**

Pour des conseils, des offres et des livraisons à prix avantageux, adressez-vous au grossiste en matériel électrique ou directement à

lanz oensingen sa e-mail: info@lanz-oens.com
CH-4702 Oensingen • Tél. 062/388 21 21 • Fax 062/388 24 24

kf 5

Entscheiden Sie sich für eine unserer Lösungen und Sie erhalten nebst den neusten Telefonapparaten, Faxgeräten und Telefonzentralen eine fachkundige Installation, Zugriff auf das flächendeckende Netz von Swisscom Mobile und Internetzugang via Bluewin mit dem leistungsfähigen ADSL-Anschluss. Eine sichere Vernetzung von Arbeitsplätzen auch über verschiedene Standorte gehört genauso zu unseren Leistungen wie eine qualifizierte Beratung und ein Service, die beide auch nach dem Kauf weitergehen. Damit Sie noch mehr Zeit für Ihre Kunden haben. **Rufen Sie uns an für eine kostenlose Beratung:** Zürich 044 295 37 77, Luzern 041 367 25 25, St. Gallen 071 492 21 21, Olten 062 832 18 18, Lausanne 021 216 61 61. www.swisscom-fixnet.ch/kmu.

Warum nicht einfach von persönlicher Beratung profitieren?

Festnetz, Mobile, Internet und Data für alle KMU.

swisscom fixnet

Einfach verbunden.

Der Vito. Keiner passt besser zu Ihnen.

Mercedes-Benz – eine Marke von DaimlerChrysler

Wetten, es gibt Ihren massgeschneiderten Vito.

► Mit dem Vito stellen Sie so gut wie alles in den Schatten. Denn dank seiner unübertroffenen Modellvielfalt und seinem Variantenreichtum hat er für jede Transportaufgabe die passende Lösung.

► Sie können zwischen Kombi, Kastenwagen und Mixto in bis zu 3 Aufbaulängen wählen. Bei Kastenwagen und Mixto haben Sie ausserdem die Wahl zwischen 2 Dachhöhen. Die Nutzlast beträgt bis zu 950 kg, das Volumen des Laderaums bis zu 6,49m³ und die Auswahl zwischen 3 CDI-Diesel- und 2 Benzinmotoren bringt Sie richtig in Fahrt. Für welchen Vito Sie sich auch entscheiden, eines ist sicher: Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP®, ABS, ASR und BAS sind in allen Fahrzeugvarianten serienmässig mit an Bord.

► Welcher Vito am besten zu Ihnen passt, erfahren Sie bei einer Probefahrt in Ihrer Mercedes-Benz Vertretung, unter Fax 01 755 82 26 oder im Internet auf www.mercedes-benz.ch

Mercedes-Benz

TRANSPORTER-SWISS-INTEGRAL (TSI): ALLE REPARATUREN UND WARTUNGSDIENSTE BIS 3 JAHRE ODER 100 000 KM GRATIS. DAS ZUERST ERREICHTE GILT.