

„Holzstapel“ für Photonen

Im Jahre 1987 führten S. John und E. Yablonovitch die „Photonischen Kristalle“ (photonic crystals, PC) mit zwei bahnbrechenden Arbeiten in die Physik ein [1]. Darin beschreiben sie völlig neuartige optische Eigenschaften von periodischen dielektrischen Strukturen, die – bei geeignetem Design – eine vollständige Bandlücke aufweisen, d. h. Photonen mit einer Energie innerhalb dieses Bereichs werden nicht durch den PC transmittiert. Damit könnten sich auf lange Sicht „integrierte Halbleiter für Licht“ realisieren lassen, die mit Photonen statt mit Elektronen arbeiten.

Physiker um Sh. Ogawa (Univ. Kyoto) berichten nun, dass es ihnen gelungen ist, dreidimensionale (3D) photonische Kristalle so herzustellen, dass sich Punktdefekte und Lichtemitter gezielt einbauen lassen [2]. Die untersuchten Kristalle werden auf Grund ihres Aussehens auch als „Holzstapel“ (engl. wood-piles) bezeichnet.

Eine Arbeitsgruppe vom Mas-

sachusetts Institute of Technology (MIT) hat eine Methode entwickelt, mit der sich 3D photonische Kristalle auf Silizium-Basis herstellen lassen [3]. Dies geschieht durch schichtweises Abscheiden und einen darauf folgenden Prozesszyklus. In einem zweiten Schritt können statistisch verteilte Punktdefekte eingefügt werden.⁺⁾

Um die Eigenschaften von photonischen Kristallen zu verstehen, sind Konzepte der Festkörperphysik, wie z. B. die Theorie der Bandstrukturen, sehr hilfreich (Abb. 1). In periodischen Materialien werden Elektronen bzw. Photonen in Bändern erlaubter Zustände (Moden) transmittiert. Da es in einer energetischen Bandlücke keine Moden gibt, ist eine Ausbreitung nicht möglich. Punktdefekte können jedoch in photonischen Kristallen als Mikroresonatoren wirken. Sie besitzen lokale Zustände mit Frequenzen innerhalb der Bandlücke, so dass sich mit geeignet angeordneten Defekten Licht durch einen photonischen Kristall leiten lässt.

In zweidimensionalen (2D) photonischen Kristallen, d. h. peri-

odischen Anordnungen von Stäben oder Poren im (sub) μm -Bereich, kann man durch konventionelle Lithographie und Ätzverfahren relativ einfach Punktdefekte und

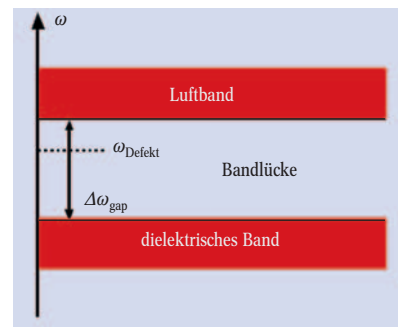


Abb. 1: Schematische Bandstruktur der Photonenergie ω in einem photonischen Kristall: Zwischen Luftband und dielektrischem Band existiert eine Bandlücke $\Delta\omega_{\text{gap}}$. Die Zusatz-Mode ω_{Defekt} innerhalb der Bandlücke wird durch einen lokalen Punktdefekt hervorgerufen.

Wellenleiter herstellen. Aber diese Klasse photonischer Kristalle bietet nicht alle gewünschten Eigenschaften der PCs. Insbesondere reichen 2D Bandlücken noch nicht aus, um Licht vollständig zu reflektieren oder die spontane Emission komplett unterdrücken zu können. Darüber hinaus sind Photonenverluste bei abrupten Krümmungen der Wellenleiter kaum zu vermeiden.

Bislang ist eine Vielzahl von 3D photonischen Kristallstrukturen vor-

⁺⁾ Anm. der Autoren: Dieser Beitrag entstand auf Grundlage unseres *Perspective*-Artikels in *Science* **305**, 187 (2004), der [2] vorstellte und besprach. Praktisch zeitgleich erschien [3] mit sehr ähnlicher Zielstellung. Diese Arbeit kann hier lediglich sehr kurz besprochen werden.

#) Beim Waferbonden werden zwei polierte und hochreine Wafer aufeinander gepresst und danach getempert. Sie gehen auf diese Weise eine dauerhafte Verbindung ein. Waferbonden ist eine etablierte Methode für mikroelektronische Anwendungen (MEMS) und um sog. Silizium-auf-Isolator-(SOI)-Wafer zu fertigen [9].

*) Da diese photonischen Kristalle keine interne Lichtquelle enthalten, werden Transmission und Reflexion mittels FTIR-Spektrometer mit einem IR-Mikroskop gemessen.

geschlagen worden, oft in Analogie zu den Elementarzellen und Gittertypen der klassischen Kristallographie [4]. Eine Reihe dieser Konzepte konnte experimentell auch realisiert werden, wie z. B. die inversen Opale [5], elektrochemisch geätzte Strukturen oder – mit speziellen Abscheidetechniken – Spiral-Architekturen [6]. Siliziumbasierte photonische Kristalle mit einer optimierten Geometrie erreichen bislang Bandlücken von mehr als 25 %, bezogen auf die Mittenfrequenz der Bandlücke. Leider erlauben die meisten Herstellungsverfahren nicht den gezielten Einbau von Punktdefekten oder Wellenleitern. Eine mögliche Kombination von holographischer Lithographie [7] mit dem direkten Laserschreiben [8] in lichtempfindlichen Medien ermöglicht es, 3D photonische Kristalle sehr flexibel zu produzieren, wobei man auch hier die Absicht verfolgt, Defekte gezielt einzubauen.

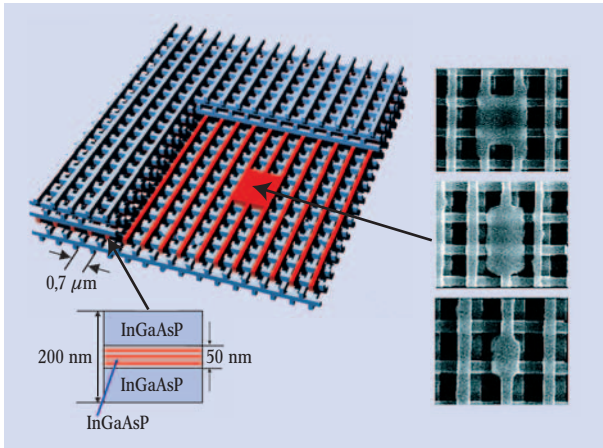


Abb. 2: Der photonische Kristall aus GaAs mit Holzstapelgeometrie hat eine vollständige Bandlücke. Integriert ist ein InGaAsP-Multi-Quantenwell als Emitter. Im gekennzeichneten Bereich wurden unterschiedliche Punktdefekte (siehe REM-Teilbilder) generiert, deren Moden in der Bandlücke durch Photolumineszenz gemessen wurden. (Bildmontage nach [2])

Ogawa et al. haben die von ihnen untersuchten photonischen Kristalle vom Holzstapeltyp in mehreren Schritten hergestellt [2]:

- ▶ 1. lithographische Vorstrukturierung der Waferoberflächen mit einem System paralleler Linien,
- ▶ 2. Ätzen der entsprechenden Gräben, und
- ▶ 3. Bonden^{#)} von zwei Wafern unter einem Drehwinkel von 90°.

Indem man einen der Wafer auf die Dicke einer Stapellage chemisch herunterätzt und den Bondprozess nach einer entsprechend präzisen Justierung mehrfach wiederholt, kann man Holzstapelstrukturen mit 4, 8 oder mehr einzelnen Schichten

herstellen. Der schrittweise Aufbau der PCs erlaubt es, Punktdefekte, und durch eine entsprechende Lithographie sicher auch Wellenleiter, in einzelne Schichten einzubringen. Darüber hinaus lässt sich durch Waferbonden auch eine optisch aktive Schicht zwischen zwei Stapel einfügen, die als Lichtquelle fungiert, wenn sie gepumpt wird.

Die von Ogawa et al. realisierte Holzstapelstruktur (Abb. 2) besteht aus einem photonischen GaAs-Kristall mit Punktdefekt und einer InGaAsP-Multi-Quantenwellstruktur als Lichtemitter. Die gemessenen Photolumineszenz-(PL)-Spektren weisen klar eine vollständige Bandlücke nach. Zusätzlich zeigen sie Defektmodes innerhalb der Bandlücke, die, wie theoretisch erwartet, von der Defektgröße abhängen. Es ist den Autoren auch gelungen, einzelne Punktdefekte im photonischen Kristall durch μ PL mit einer Wellenlänge von 1,55 μ m abzubilden. Das entspricht einer Defektmode innerhalb der Bandlücke der Holzstapelstruktur.

Welche technologischen Schlussfolgerungen lassen sich nun daraus ziehen? Im Prinzip könnte sich eine Kombination von Lithographie, Ätzverfahren und Waferbonding auf komplexere photonische Schaltkreise erweitern lassen. Doch um die Vorteile von 3D photonischen Kristallen in vollem Umfang nutzen zu können, muss man die Anzahl der Schichten erhöhen. Die große Frage ist, ob die Technik des Waferbondens ein ökonomisch und technologisch praktikabler Fertigungsansatz für aufwändige, nutzbare photonische Komponenten ist. Nach heutigem Kenntnisstand ist es für eine effiziente Herstellung nötig, vor allem das Problem der translatorischen und angularen Justierung im Wafermaßstab zu lösen. Ein weiteres Problem besteht in den Kosten für das präzise Herunterätzen aller Wafer auf die Dicke einer Stapellage. Dies könnte sich als insgesamt zu zeitaufwändig für eine Massenproduktion erweisen.

Ein nächster sinnvoller Schritt hin zur Anwendung dürften 3D photonische Schaltkreise sein, die z. B. Felder von Wellenleitern oder integrierte Strahlteiler enthalten. Es gibt Arbeiten, die sich mit dem gezielten Anpassen von Bandlückenmaterialien, d. h. einer genauen Einstellung oder Verschiebung der Bandlücke befassen, ebenso, wie Bestrebungen, nichtlineare Effekte

und Schaltmöglichkeiten zu realisieren. Die Herstellung von siliziumbasierten Strukturen wäre attraktiv, in diesem Fall mit einer optisch gepumpten aktiven Schicht aus SiO₂, dotiert mit Silizium-Nanokristallen und Erbium, das im Bereich von 1,5 μ m emittiert. Die erforderliche Justierung der Stapelschichten beim Bonden wäre wahrscheinlich auf Grund der kleineren elektronischen Bandlücke in Silizium komplizierter als im Fall von GaAs in [2].

Die von M. Qi et al. [3] beschriebenen photonischen Kristalle werden aus Silizium hergestellt. Das geschieht jedoch, ausgehend von einem Si-Substrat, durch zyklisch wiederholtes Materialabscheiden, einen Lithographieschritt, Ätzen und Polieren. Auf diese Weise entstehen photonische Kristalle in Form einer Mehrfachstapelung von Si-Schichten mit Poren und Si-Stäben. Punktdefekte werden in einem zweiten Prozesszyklus durch gezieltes „Nicht-Ätzen“ einzelner Poren eingebracht. Die Anordnung dieser Mikro-Resonatoren ist gewollt nicht-periodisch mit einer Fehlstellen-Konzentration von bis zu 15 %, um die messtechnische Charakterisierung zu ermöglichen.^{*)} Die Defektmodes in der Bandlücke sind dabei klar zu erkennen und stimmen gut mit den theoretischen Berechnungen überein. Je nach Ausführung der photonischen Kristalle und der eingebauten Defekte liegen die Resonatorwellenlängen bei 1,3 μ m, 1,4 μ m oder 1,5 μ m. Nach Aussage der Autoren von [3] ist ihre zweifellos anspruchsvolle Herstellungsmethode robust und somit geeignet, um in Zukunft „eventuell“ 3D optische integrierte Schaltkreise herzustellen.

REINALD HILLEBRAND UND
ULRICH GÖSELE

- [1] S. John, Phys. Rev. Lett. **58**, 2486 (1987); E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987)
- [2] Sh. Ogawa et al., Science **305**, 227 (2004)
- [3] M. Qi et al., Nature **429**, 538 (2004)
- [4] K. M. Ho et al., Phys. Rev. Lett. **65**, 3152 (1990)
- [5] A. Blanco et al., Nature **405**, 437 (2000)
- [6] O. Toader und S. John, Science **292**, 1133 (2001)
- [7] Y. V. Miklyaev et al., Appl. Phys. Lett. **82**, 1284 (2003)
- [8] M. Deubel et al., Nature Materials **3**, 444 (2004)
- [9] M. Alexe und U. Gösele (Hrsg.), Wafer Bonding – Applications and Technology, Springer, Berlin (2004)

Dr. Reinald Hillebrand und Prof. Dr. Ulrich Gösele, Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Weinberg 2, 06120 Halle