



Markus Augustin¹



Chii-Chang Chen²



Thomas Pertsch¹



Andreas Tünnermann



Ernst-Bernhard Kley¹



Stefan Nolte¹

Photonische Kristalle sind periodische, dielektrische (Nano)strukturen. Analog zu Halbleiterkristallen wird darin die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen beeinflusst, wo die Bewegung der Elektronen durch ein periodisches Potential und durch die Existenz von erlaubten und verbotenen Energiebändern bestimmt wird. Die Abwesenheit erlaubter propagierender Moden innerhalb der Struktur – in einem Wellenlängenbereich, der als photonische Bandlücke bezeichnet wird – erlaubt die Realisierung konkreter Bauelemente mit unterschiedlichsten Funktionalitäten. Hervorzuheben sind hierbei insbesondere Wellenleiter und Resonatoren. Das viel versprechende Potential dieser Elemente ist aber durch sehr große Koppelverluste zur Außenwelt, welche durch kleine Modenfelder bedingt sind, deutlich limitiert. Eine Abhilfe versprechen hierbei ebenfalls Photonische Kristalle, wobei hier allerdings nicht die Existenz und Größe der Bandlücke entscheidend sind, sondern dass diese bei einem Lichtstrahl eine gezielte Phasenänderung bewirken, welche sich in einer Fokussierung des Lichtes äußert. Dadurch sollte eine hocheffiziente Ankopplung an die deutlich kleineren Modenfelder photonischer Kristallwellenleiter möglich sein.

Eine Fokussierung von Licht mittels einer Linse wird normalerweise durch einen Phasenfaktor bewirkt, welcher durch die konvex gewölbte Form eines homogenen Materials induziert wird. Analog hierzu ist eine Fokussierung auch in einem Material mit einer Gradientenindexverteilung möglich. Eine solche Verteilung kann auch durch eine Nanostrukturierung erreicht werden, indem ein Parameter der periodischen Struktur kontinuierlich verändert wird (z. B. der Lochdurchmesser). Mit Hilfe einer Finite-Differenz Time-Domain (FDTD) Simulation ist für eine Struktur bestehend aus Löchern

in einer quadratischen Anordnung im Abstand von 1241 nm und einer linearen Variation des Lochdurchmessers von 500 nm zu 993 nm dieser Fokussierungseffekt überprüft worden. Hierbei konnte bei einer Wellenlänge von 1,55 μm eine Fokussierung auf eine Halbwertsbreite von etwa 1,5 μm beobachtet werden (Abb. 1).

Zweidimensionale Strukturen sind mittels Elektronenstrahlithographie hergestellt worden. Die vertikale Führung von Licht ist hierbei unter Nutzung des Prinzips der Totalreflexion möglich – der Photonische Kristall wird zwischen zwei niedrigbrechenderen Schichten gelagert. Entgegen der bisher in der Literatur für die Realisierung Photonischer Kristalle verwendeten hochbrechenden Materialien wie Silizium und Gallium-Arsenid erfolgte in Jena die Untersuchung Photonischer Kristalle auf der Basis von Siliziumnitrid, welches auch im sichtbaren Spektralbereich transparent ist. Statt einer Brechzahl von über drei liegt hier nur eine Brechzahl ~ 2 vor.

In Abb. 2 ist eine REM-Aufnahme eines Photonischen Kristalls zu sehen, der den gewünschten Gradienten im Lochdurchmesser aufweist und dadurch für eine Wellenlänge von 1,55 μm die Fokussierung von Licht in einen Photonischen Kristallwellenleiter erlaubt. Dieser Wellenleiter ist im Bild rechts zu sehen. Hierdurch sollte es möglich sein, eines der wesentlichen Probleme Photonischer Kristallwellenleiter, nämlich die sehr hohen Koppelverluste, deutlich zu verringern und damit diese anwendungstauglich zu machen.

¹ Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik
² National-Central-University, Institute of Optical Sciences, Taiwan

Photonic crystals are periodic dielectric (nano)structures. They affect the propagation of electromagnetic waves in the same way as the periodic potential in a semiconductor crystal affects electron motion; by defining allowed and forbidden electronic energy bands. The absence of allowed propagation modes inside the structures, over a range of wavelengths called a photonic band gap, makes the realization of concrete components with distinct functionality possible; of particular note are waveguides and resonators. However the promising potential of these devices is limited by huge coupling losses to the outside world which are caused by very small mode fields. A solution to this problem can be found in Photonic Crystals themselves, although in this regard the existence or size of the band gap is not the important feature but rather that the Photonic Crystal causes a specific phase change in a light beam leading to a focusing of the beam. Thereby a highly efficient coupling to the much smaller mode fields of the photonic crystal waveguides should become possible.

Focusing light by means of a lens is normally caused by the induction of an appropriate phase factor by the convex curvature of a homogenous material. A similar type of focusing is also possible with a material featuring a gradient index distribution. Such a distribution can also be accomplished by a nano-structuring, e. g. if one parameter of the periodic structure, such as the hole diameter is continuously changing.

With the help of a finite-difference time-domain (FDTD) simulation this focusing effect was verified for a structure consisting of air holes in a square lattice with a pitch of 1 241 nm and a linear variation of the diameter

from 500 nm to 993 nm. In this case a focusing of light with a wavelength of 1.55 μm to a full width half maximum of 1.5 μm was observed in the simulation (Fig. 1).

Two dimensional structures are fabricated by electron beam lithography. The vertical confinement of light is accomplished by exploiting the principle of total internal reflection – the photonic crystal is placed between layers with a lower refractive index. In contrast to reports in the literature, where high index materials such as silicon or gallium arsenide are used for the realization of photonic crystals, the investigations in Jena have been concentrated on silicon nitride, which is also transparent in the visible spectral range. Using silicon nitride, a refractive index of ~ 2 can be found, as opposed to a refractive index of over 3.

In Fig. 2 SEM images of a Photonic Crystal are shown. This crystal exhibits the desired gradient in the hole diameter and thereby allows the focusing of light, for a wavelength of 1.55 μm , into a Photonic Crystal waveguide. This waveguide can also be seen in Fig. 2 on the right. Using this technique it should be possible to reduce the huge coupling losses and thereby solve one of the major problems of photonic crystal waveguides and thus make them suitable for a wide range of applications.

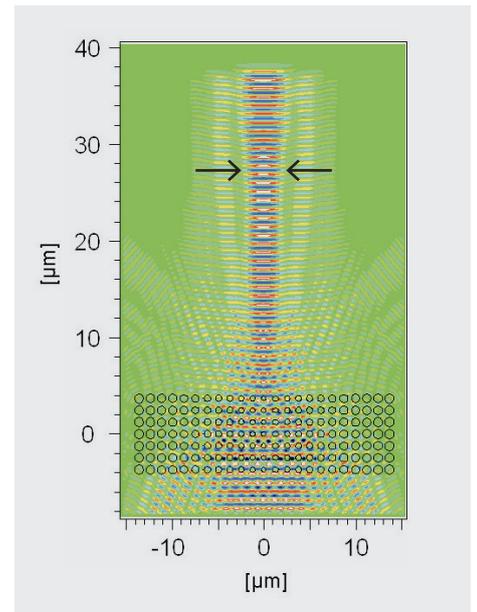
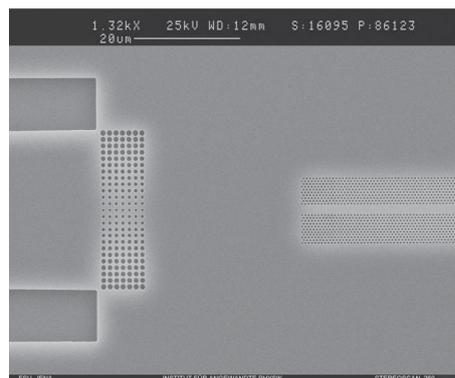


Abb. 1: Mit Hilfe einer Gradientenstruktur kann eine Fokussierung erreicht werden. Die Struktur besteht im Detail aus Löchern in einer quadratischen Anordnung, deren Durchmesser zur Mitte hin linear kleiner werden. Hierdurch ist eine Fokussierung des Lichts auf eine Halbwertbreite von etwa 1,5 μm möglich.

Fig. 1: With a gradient structure focusing can be achieved. In detail, this structure consists of air holes in a square lattice, where from the middle of the structure the hole-diameter is linearly increased. Thereby the focusing of light to a full width half maximum of 1.5 μm is enabled.

Abb.2: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer Gradientenstruktur, mit deren Hilfe es möglich sein sollte, die Koppelverluste von Photonischen Kristallwellenleitern deutlich zu verringern. Rechts im Bild ist außerdem ein Photonischer Kristallwellenleiter zu sehen, in den mit Hilfe dieser »Photonischen Kristalllinse« eingekoppelt werden kann.

Fig. 2: SEM image of a gradient structure allowing the drastic reduction of coupling losses of photonic crystal waveguides. On the right side of the image such a photonic crystal waveguide is also shown, in which light can be coupled with this "photonic crystal lens".