



Arkadi Chipouline <sup>1</sup>



Carsten Schmidt <sup>1</sup>



Thomas Käsebier <sup>1</sup>



Oleg Egorov <sup>2</sup>



Andreas Tünnermann <sup>1,3</sup>



Thomas Pertsch <sup>1</sup>



Ernst-Bernhard Kley <sup>1</sup>



Falk Lederer <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik, Friedrich-Schiller-Universität Jena

<sup>2</sup> Institut für Festkörpertheorie und -optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena

<sup>3</sup> Fraunhofer IOF

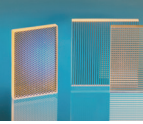
Optische Mikroresonatoren, die in verschiedenen Geometrien realisiert werden können (z. B. Mikrokugel-, Mikrodisk-, Mikroring- und Mikroto-roidresonatoren <sup>1–3</sup>) erfuhren in den letzten Jahren stetig wachsendes Interesse. Gründe dafür sind unter anderem die möglichen Anwendungen solcher Strukturen in der nächsten Generation opto-elektronischer Bauelemente, wie z. B. »Add-Drop«-Filter, Mikrolaser, Wellenlängenkonverter, Sensoren, um nur einige Beispiele zu nennen <sup>4–5</sup>. Des Weiteren bieten Mikroresonatoren eine ausgezeichnete experimentelle Grundlage für die Untersuchung verschiedenster fundamentaler linearer und nichtlinearer physikalischer Phänomene, nicht nur in der Optik <sup>6–7</sup>. Mikroresonatoren zeigen unverhältnismäßig hohe Gütefaktoren von gewöhnlich  $10^8$  (mit etwas mehr Aufwand bis zu  $10^{11}$ ), wodurch sich nichtlineare Effekte schon bei sehr geringen Pumpleistungen (in Größenordnungen von Milliwatt) beobachten lassen, was mit anderen Strukturen praktisch nicht möglich ist.

Aufgrund der Feldverteilung innerhalb des Resonators (das elektromagnetische Feld ist entlang der inneren Grenzfläche stark lokalisiert) nennt man die Resonanzen eines Mikroresonators mit Zylinder- oder Kugelsymmetrie »Whispering-Gallery-Moden«.

Zur effektiven Anregung solcher Moden verwendet man eine getaperte (verjüngte) Faser, deren Durchmesser so weit verringert wurde, dass einerseits Phasenanpassung zwischen Resonatormode und Fasermode vorliegt und andererseits der evaneszente Anteil der Fasermode außerhalb des Claddings signifikant ist. Bringt man den Fasertaper nah genug an die Resonatoroberfläche (Abb. 1), können beide Moden über ihre evaneszenten Felder miteinander koppeln und Energie austauschen.

Die Resonanzen eines Mikroresonators werden dabei indirekt über die Transmission durch den Fasertaper bestimmt, sie sind als Einbrüche im Transmissionspektrum sichtbar. Führt man einen Wellenlängenscan von kleinen zu großen Wellenlängen durch, kommt es bei ausreichender Pumpleistung zu einer asymmetrischen Verbreiterung der Resonanzkurve mit einer sehr steilen Flanke bei höheren Wellenlängen.

Führt man den Wellenlängenscan von großen zu kleinen Wellenlängen durch, ist keine Verbreiterung zu beobachten, es tritt eine typische Lorentzresonanz auf (Abb. 2). Dieses Verhalten ist ein deutliches Zeichen optischer Bistabilität, auf deren Grundlage beispielsweise opto-optische Schalter realisiert werden können.



Optical microresonators of different topologies (microsphere, microdisc, microring and microtoroid resonators /1–4/) attracted a lot of interest the last decade. The potential application of such structures in the next generation of opto-electronic devices such as add-drop filters, micro lasers, wavelength converters, and sensors, to name just a few examples /5–6/. Furthermore, the microresonators provide a convenient laboratory for the investigation of fundamental linear and nonlinear physical phenomena, appearing not only in optics /7–8/. Such microresonators show unprecedentedly high Q-factors – up to  $10^{11}$  in best cases and about  $10^8$  routinely – which allows reaching thresholds for various nonlinear effects at rather low excitation powers of the order of milliwatts, which is practically impossible with other optical systems.

Due to the specific spatial field distribution inside the resonator (the electromagnetic field is strongly localized just underneath the resonator's surface), the resonances possessing cylindrical or spherical symmetry are called "whispering-gallery-modes".

For an effective excitation of these modes a tapered fiber is used. In such fiber its diameter is adiabatically reduced to several microns in order to provide phase matching between the resonator mode and the fiber mode as well as to push a significant evanescent part of the fiber mode out of the cladding. Bringing the tapered fiber close to the surface of the resonator (Fig. 1) both modes can exchange energy due to the overlap of their evanescent fields.

Measuring the taper transmission the modes of the microresonator can be observed as resonance dips in the transmission spectrum. Realizing a wavelength scan from smaller to longer wavelengths with sufficient input power an asymmetric resonance broadening with an abrupt rise at the longer wavelength side occurs.

Carrying out the wavelength scan from longer to smaller wavelengths no resonance broadening could be observed and a typical Lorentz dip appears (Fig. 2). This behavior is a clear sign of optical bistability, on which basis opto-optical switches could be realized.

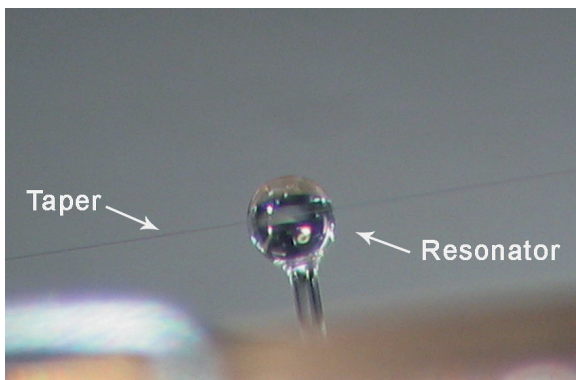
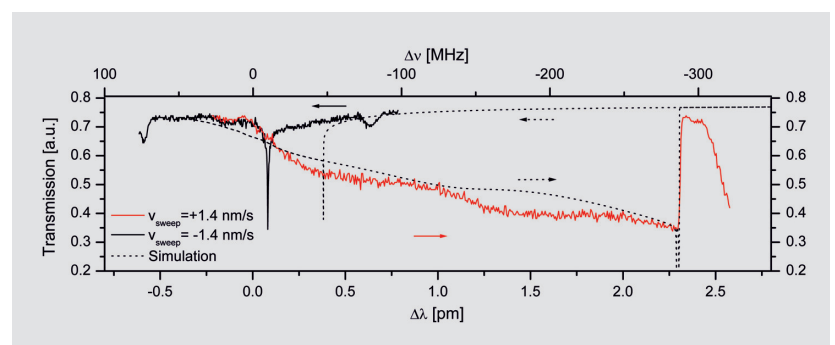


Abb. 1: Mikrokugelresonator mit Fasertaper zur Anregung von »Whispering-Gallery-Moden«.

Fig. 1: Microsphere resonator with tapered fiber for excitation of "whispering-gallery-modes".

Abb. 2: Optische Bistabilität der Resonanzmoden aufgrund einer richtungsabhängigen Resonanzverbreiterung.

Fig. 2: Optical bistability of resonator modes due to a resonance broadening which is sweeping direction dependent.



Das Hauptaugenmerk der Arbeiten liegt auf der Untersuchung gekoppelter Mikroresonatoren in Form von Mikrodisk- (Abb. 3) und Mikrokugelresonatoren (Abb. 4) im linearen und nichtlinearen Pumplleistungsregime. Im linearen Fall sollen Lokalisierungen des Lichts innerhalb der Struktur aufgrund von zufälligen (herstellungsbedingten) Parametervariationen benachbarter Resonatoren untersucht werden (in Analogie zur in der Festkörperphysik bekannten Anderson-Lokalisierung). Im nichtlinearen Fall treten Effekte auf, die im Umfeld der raum-zeitlichen nichtlinearen Dynamik dissipativer Systeme untersucht werden. Dieser Teil der nichtlinearen Dynamik ist von großem Interesse, da die hier benutzten Modelle zur Beschreibung gekoppelter Resonatoren auch auf andere physikalische und nichtphysikalische Systeme angewendet werden können, deren experimentelle Untersuchung jedoch weitaus schwieriger bzw. nicht vollständig möglich ist.

Die Transmissionsspektren gekoppelter Resonatoren unterscheiden sich (auch im linearen Fall) deutlich von den Transmissionsspektren einzelner Resonatoren. Abbildung 5 verdeutlicht dies am Beispiel zweier sich berührender Mikrokugelresonatoren (dargestellt ist die Energie im inneren beider Resonatoren über der normierten Frequenz, die proportional zum Verhältnis von Radius und Wellenlänge des verwendeten Lichts ist). Gegenüber einem einzelnen Resonator, bei dem im abgebildeten Bereich nur ein Resonanzpeak auftritt, spaltet die Resonanz für gekoppelte Kugeln in viele einzelne Resonanzpeaks bei unterschiedlichen Frequenzen auf. Die mehrfache Entartung der Moden, die im einzelnen Resonator vorliegt, wird durch die Kopplung der beiden Resonatoren aufgehoben. Ein Modell zur Beschreibung gekoppelter Mikrokugelresonatoren beruht dabei auf der

Entwicklung der elektromagnetischen Felder in vektor-sphärische-harmonische Funktionen (VSH) /8–9/, welche die Feldverteilung entsprechender Eigenmoden im Resonator beschreiben.

Durch die Verwendung der Translations-eigenschaften der VSH können die Eigenmoden beliebig im Raum positionierter Mikrokugelresonatoren in einem Koordinatensystem beschrieben werden, wodurch die Wechselwirkung der verschiedenen Moden untereinander berechnet werden kann. Die Berechnungen können dabei je nach Größe der Resonatoren und der verwendeten Wellenlänge sehr umfangreich sein, da sehr viele Moden miteinander koppeln.

Im Allgemeinen beschränkt man sich daher bei exakten Berechnungen auf wenige, verhältnismäßig kleine Resonatoren. Bei der Verwendung eines analogen Modells für gekoppelte Mikrodiskresonatoren muss man sich auf eine zweidimensionale Betrachtung beschränken, da die Moden eines dreidimensionalen Diskresonators nicht analytisch bestimmt werden können. Nichtsdestotrotz können die grundlegenden Effekte der Kopplung auch in einem zweidimensionalen Modell beschrieben werden.

Teile dieser Arbeit werden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert (Forschergruppe 532 Projekt C).

#### Literatur:

- /1/ Vahala, K. J.: Optical microcavities, *Nature* 424, (2003) 839–846.
- /2/ Johnson, T. J.; Borselli, M.; Painter, O.: Self-induced optical modulation of the transmission through a high-Q silicon microdisc resonator, *Opt. Express* 14, (2006) 817–831.
- /3/ Armani, D. K.; Kippenberg, T. J.; Spillane, S. M.; Vahala, K. J.: Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip, *Nature* 412, (2001) 925–928.
- /4/ Matsko, A. B.; Ilchenko, V. S.: Optical resonators with whispering-gallery modes – part II: applications, *IEEE J. Sel. Quant. Electr.* 12, (2006) 15–32.
- /5/ Armani, A. M.; et al.: Label-Free, Single-Molecule Detection with optical microcavities, *Science* 317, (2007) 783–787.
- /6/ Matsko, A. B.; Ilchenko, V. S.: Optical resonators with whispering-gallery modes – part I: basics, *IEEE J. Sel. Quant. Electr.* 12, (2006) 3–14.
- /7/ Mookherjea, S.; Yariv, A.: Kerr-stabilized super-resonant modes in coupled-resonator optical waveguides, *Phys. Rev. E* 66, (2002) 046610.
- /8/ Rakovich, Y. P.; et al.: Fine Structure of coupled optical modes in photonic molecules, *Phys. Rev. A* 70, (2004) 051801.
- /9/ Miyazaki, H.; Jimba, Y.: Ab initio tight-binding description of morphology-dependent resonance in a biosphere, *Phys. Rev. B* 62, No. 12, (2000) 7976–7997.

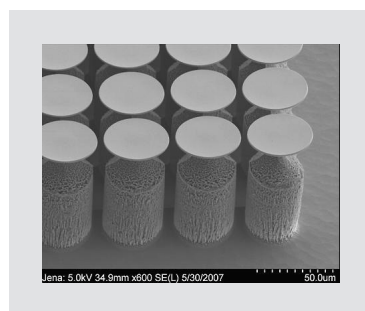


Abb. 3:  
Array von Mikrodiskresonatoren.

Fig. 3:  
Array of microdisc resonators.

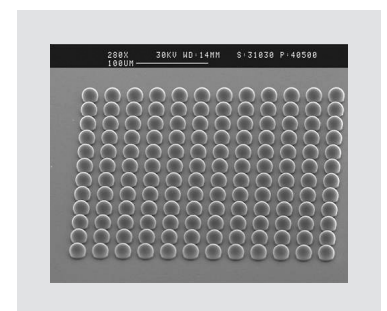
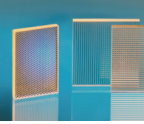


Abb. 4:  
Array von Mikrokugelresonatoren.

Fig. 4:  
Array of microsphere resonators.



The main topic of our research is the investigation of arrays of coupled microresonators in form of microdiscs (Fig. 3) and microspheres (Fig. 4) in linear and nonlinear operation modes. In the linear case effects of light localization due to small random parameter variations (from the fabrication of the samples) are investigated (in analogy with the Anderson localization in solid state physics). In the nonlinear case the appearing effects can be described in the framework of the general approach of spatio-temporal nonlinear dynamics in dissipative systems. This part of nonlinear dynamics is of great interest due to the fact that the models used to describe coupled resonators can also be applied to other physical systems, where experimental realization is much more complicated or can not be performed at all.

The transmission spectra of coupled resonators strongly differ from those of a single resonator (even in the linear case). Figure 5 illustrates this fact for two microsphere resonators in contact, where the internal energy inside of both resonators is shown as a function of the normalized frequency which is proportional to the ratio of resonator size and wavelength of light. In comparison with a single resonance peak occurring

for an uncoupled resonator, for the coupled spheres the resonance splits in many peaks at various frequencies. Due to the coupling of both resonators the manifold degeneracy of the modes breaks up. For the description of coupled microsphere resonators a model is used where the electromagnetic field is expanded in so called vector spherical harmonics (VSH) /8–9/, which are eigenmode solution for a single microsphere.

Using translational transformation properties of the VSH the eigenmodes of resonators placed arbitrary in space could be described in one coordinate system and therefore the interaction of different modes can be calculated. Depending on the size of the resonators and the wavelength used the calculations can be very expensive. Therefore, exact calculations are restricted to only a few and relatively small resonators.

Using a similar model for the coupled microdisc resonators, one is restricted to a two dimensional description because the eigenmodes of a 3D disc resonator can not be obtained analytically. Nevertheless, general effects of the coupling can be discussed in a 2D model as well.

Parts of this work were funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (research unit 532 project C).

References:

- /1/ Vahala, K. J.: Optical microcavities, Nature 424, (2003) 839–846.
- /2/ Johnson, T. J.; Borselli, M.; Painter, O.: Self-induced optical modulation of the transmission through a high-Q silicon microdisc resonator, Opt. Express 14, (2006) 817–831.
- /3/ Armani, D. K.; Kippenberg, T. J.; Spillane, S. M.; Vahala, K. J.: Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip, Nature 412, (2001) 925–928.
- /4/ Matsko, A. B.; Ilchenko, V. S.: Optical resonators with whispering-gallery modes – part II: applications, IEEE J. Sel. Quant. Electr. 12, (2006) 15–32.
- /5/ Armani, A. M.; et al.: Label-Free, Single-Molecule Detection with optical microcavities, Science 317, (2007) 783–787.
- /6/ Matsko, A. B.; Ilchenko, V. S.: Optical resonators with whispering-gallery modes – part I: basics, IEEE J. Sel. Quant. Electr. 12, (2006) 3–14.
- /7/ Mookherjea, S.; Yariv, A.: Kerr-stabilized super-resonant modes in coupled-resonator optical waveguides, Phys. Rev. E 66, (2002) 046610.
- /8/ Rakovich, Y. P.; et al.: Fine Structure of coupled optical modes in photonic molecules, Phys. Rev. A 70, (2004) 051801.
- /9/ Miyazaki, H.; Jimba, Y.: Ab initio tight-binding description of morphology-dependent resonance in a biosphere, Phys. Rev. B 62, No. 12, (2000) 7976–7997.

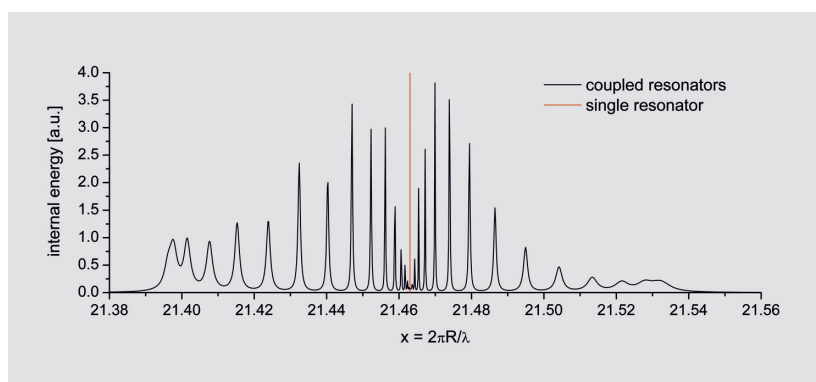


Abb. 5: Resonanzaufspaltung durch Kopplung zweier identischer Mikrokugelresonatoren (die rote Linie markiert die Resonanzposition für einen einzelnen Resonator).

Fig. 5: Splitting of resonances due to coupling of two identical microsphere resonators (the red line marks the position of the single resonator resonance).