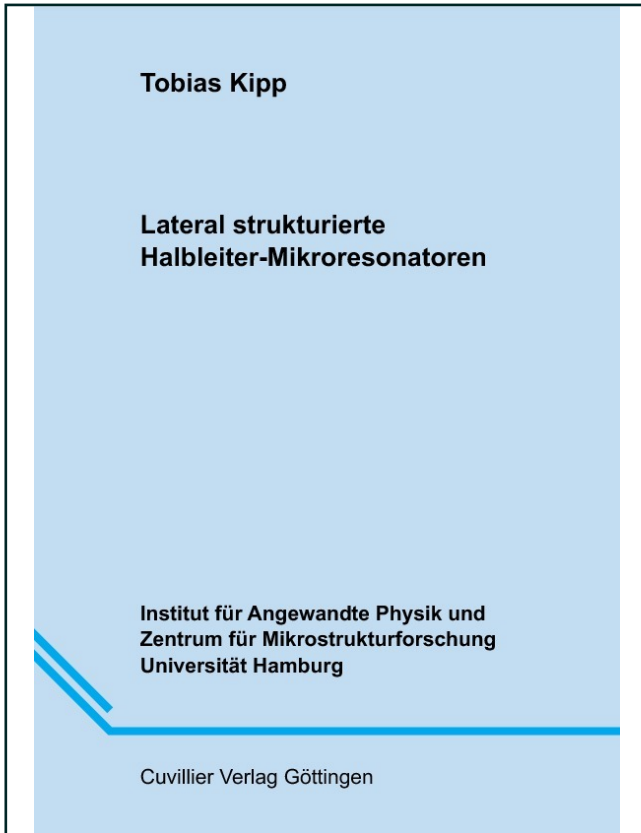




Tobias Kipp (Autor)

Lateral strukturierte Halbleiter -Mikroresonatoren



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2950>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Kapitel 1

Einleitung

Optische Halbleiter-Mikroresonatoren ermöglichen den Einschluss von Licht in einer oder mehreren Dimensionen auf Längenskalen im Bereich der Wellenlänge des Lichts. Auf der einen Seite stellen sie in der Grundlagenforschung hervorragende Systeme dar, die Wechselwirkung von Materie mit einem lokalisierten elektromagnetischen Feld zu untersuchen, auf der anderen Seite haben sie große Bedeutung für zukünftige oder auch schon realisierte optoelektronische Anwendungen.

Voraussetzung für die Herstellung hoch qualitativer Halbleiter-Mikroresonatoren war die Möglichkeit, mittels Molekularstrahlepitaxie sehr präzise Halbleiterschichtsysteme herzustellen. Seit etwa Ende der Achtzigerjahre wurden planare Mikroresonatoren, bestehend aus dielektrischen Spiegeln um eine Resonatorschicht, intensiv untersucht. Die dielektrischen Spiegel, aufgebaut aus paarweisen Schichten unterschiedlicher Brechungsindizes, sind hoch reflektierend für Licht, wenn die einzelnen optischen Schichtdicken einem Viertel der Lichtwellenlänge entsprechen. Die Resonatorschicht hat in den Systemen eine optische Dicke im Bereich von einer oder wenigen Wellenlängen des Lichts. In diesen planaren Mikroresonatoren kann das elektromagnetische Feld in einer Richtung eingeschlossen werden. Eine genauere Beschreibung dieser Systeme wird in Kapitel 2 gegeben. Weisbuch *et al.* konnten 1992 an diesen Strukturen das so genannte Rabi-Splitting zwischen der Resonatormode und den Exzitonen eines in den Resonator eingebetteten Quantenfilms beobachten, hervorgerufen durch die starke Kopplung der Photonen einer Mode mit den Exzitonen [Wei92]. Von den vielen weiteren Publikationen zu planaren Mikroresonatoren soll hier nur eine Arbeit von Fainstein *et al.* erwähnt sein, in der gezeigt wurde, dass sich durch die Überhöhung des elektrischen Feldes innerhalb eines planaren Mikroresonators phononische Raman-spektren verstärken lassen [Fai95]. An diesen Experimenten knüpften Arbeiten unserer Forschungsgruppe zur optischen Verstärkung elektronischer Ramanstreuung an zweidimensionalen Elektronensystemen in planaren Mikroresonatoren an [Kip01, Kip02]. Planare Mikroresonatoren haben ihren Weg in die Anwendung z. B. in hoch effizienten LEDs [Nev97] und vertikal emittierenden Lasern [Iga88] gefunden.

Die laterale Strukturierung planarer Mikroresonatoren mit Strukturbreiten von wenigen Mikrometern führt zu dreidimensionalen Mikroresonatoren, in denen das elektromagnetische Feld vollständig lokalisiert ist. Solche Strukturen wurden 1996 zuerst von Gérard *et al.* und 1997 von Reithmaier *et al.* untersucht [Gér96, Rei97]. Mit diesen Strukturen, die im Folgenden wegen ihrer Analogie zu Halbleiter-Quantenpunkten als photonische Punkte bezeichnet werden, beschäftigt sich Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit.

Ein weiteres Konzept zur Herstellung von Halbleiter-Mikroresonatoren mit dreidimensionalem Lichteinschluss, nämlich das der Microdisks, wurde 1992 von McCall *et al.* vorgestellt [McC92]. Der eigentliche Resonator einer Microdisk ist eine wenige hundert Nanometer dicke dielektrische Scheibe mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern. Diese Scheibe ist von Luft umgeben und liegt nur auf einer kleinen Fläche mittig auf einem Ständer auf. Hergestellt werden Microdisks wiederum durch laterale Strukturierung von Halbleiterschichtsystemen. Die diskreten Moden in diesen Microdisks entstehen durch interne Totalreflexion von Licht an der Halbleiter/Luft-Grenzfläche. Die Herstellung und Untersuchung von Microdisks ist das Thema des Kapitels 3 dieser Arbeit.

Ähnliche Moden wie in den flachen Microdisks bilden sich in dielektrischen Kugeln, so genannten Microspheres, mit Durchmessern von 20 bis mehreren hundert Mikrometern. Diese Strukturen können z. B. hergestellt werden, indem das Ende einer Glasfaser geschmolzen wird (z. B. [Kni95]). Sie haben also kein Halbleiterschichtsystem als Ausgangspunkt und werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Dreidimensionaler Einschluss von Licht lässt sich auch in zweidimensionalen photonischen Kristallen mit eingebauten Defekten realisieren. In einem photonischen Kristall kann die periodische Modulation des Brechungsindex zu einer Bandlücke für Photonen führen, ähnlich wie das durch die Atomrümpfe in einem Halbleiterkristall verursachte periodische Potenzial zu einer Bandlücke für Elektronen führt. In diesem Sinn ist ein dielektrischer Spiegel, aufgebaut wie oben beschrieben, ein eindimensionaler photonischer Kristall. Die periodische Anordnung der einzelnen Schichten bewirkt nicht nur für eine Wellenlänge, sondern, wie in Kapitel 2 gezeigt wird, für einen ganzen Bereich von Wellenlängen eine hohe Reflektivität. Photonen dieser Wellenlängen können sich in dem Kristall nicht ausbreiten, weil ihre Energie gerade in der photonischen Bandlücke liegt. Die Resonatorschicht zwischen zwei dielektrischen Spiegeln verletzt die Periodizität des Schichtsystems. Sie stellt einen Defekt in der Struktur des photonischen Kristalls dar und kann zu einer lokalisierten Mode des elektromagnetischen Feldes führen, ähnlich wie Defekte in Halbleitern zu diskreten Zuständen für Ladungsträger mit Energien innerhalb der Bandlücke führen können. Ätzt man in eine dünne Wellleiterschicht ein periodisches Lochgitter mit einer Defektregion, so lässt sich das Lichtfeld in der Ebene in der Defektregion lokalisieren [Pai99b]. Ausgangspunkt für die Präparation dieses Mikroresonators ist wiederum ein Halbleiterschichtsystem.

Zu den vier hier vorgestellten Arten von Mikroresonatoren mit vollständigem dreidimensionalem Einschluss von Licht existiert eine sehr große Zahl an Arbeiten, von denen nur einige hier erwähnt werden sollen. Von besonderer Bedeutung sind dabei Experimente mit einem optisch aktiven Material innerhalb des Resonators. In den Mikroresonatoren mit Halbleiterschichtsystemen als Ausgangspunkt boten sich dafür zunächst Quantenfilme an. Es konnte schließlich Lasing von eingebetteten Quantenfilmen sowohl in Microdisks [McC92], als auch in photonischen Punkten [Röh97], und auch in Resonatoren aus zweidimensionalen photonischen Kristallen [Pai99a] gezeigt werden. Die Möglichkeit, selbstorganisiert gewachsene Quantenpunkte als aktives Material in die Mikroresonatoren einzubetten, gab der Forschung an den photonischen Strukturen einen weiteren Schub. Mit ihrem energetisch breiten Emissionsspektrum boten InAs-Quantenpunkte die Möglichkeit, die Modenstruktur von Mikroresonatoren genauer zu untersuchen [Gér96, Gay99]. Einzelne Quantenpunkte sind atomartige Systeme mit diskreten Energieniveaus für Ladungsträger. Die Möglichkeit, solche Systeme in hochqualitative Mikroresonatoren einzubetten, machten quantenoptische Experimente in Festkörpern möglich, die bislang der Atomphysik vorbehalten waren. Im Bereich schwacher Kopplung zwischen Resonatormode und atomartigem System konnte der Purcell-Effekt, also die Modifikation der spontanen Emissionsrate gezeigt werden, und zwar wiederum in allen drei aus planaren Schichtsystemen hervorgehenden Mikroresonatoren, also in photonischen Punkten [Gér98], Microdisks [Gér99] und Resonatoren aus zweidimensionalen photonischen Kristallen [Hap02]. Die Möglichkeit, die Emissionseigenschaft von Quantenpunkten durch einen äußeren Mikroresonator gezielt zu verändern, kann zu neuartigen Anwendungen führen. Schwellenfreie Laser scheinen realisierbar, wenn die spontane Emission des aktiven Materials ausschließlich in die Lasermode stattfindet. Es sind Laser bestehend aus einem einzelnen Quantenpunkt in einem Mikroresonator denkbar. Quantenpunkt-Microdisk-Laser wurden bereits realisiert, sie zeigen allerdings noch kein schwellenfreies Verhalten [Cao00, Mic00b]. Für quantenkryptographische Anwendungen sind Einzelphotonenquellen sehr interessant, die sowohl in Microdisks [Mic00a] als auch in photonischen Punkten [Pel02] realisiert wurden. Im Gegensatz zur schwachen Kopplung sind im Fall der starken Kopplung die Verluste innerhalb des Resonators so gering, dass es zu Vakuum-Rabi-Oszillationen kommen kann, in denen ein Photon von einem angeregten Emitter resonant in eine Resonatormode ausgesendet wird, dort umherläuft, bis es vom Emitter reabsorbiert wird und sich der Prozess wiederholen kann. So können quantenmechanisch verschränkte Emitter/Resonator-Zustände präpariert werden. Solche in der Herstellung sehr anspruchsvollen Systeme im Bereich starker Kopplung haben möglicherweise Bedeutung für die Entwicklung von Quantencomputern [Ima99].

Die obige Übersicht verdeutlicht, wie aktuell die Forschung an Halbleiter-Mikroresonatoren ist. Mikroresonatoren sind Teil der Photonik, die erst am Anfang ihrer Entwicklung steht und die in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen wird.

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei Arten von lateral strukturierten Halbleiter-Mikroresonatoren hergestellt und untersucht: photonische Punkte und Microdisks. Beiden Resonatorarten ist jeweils ein ähnlich aufgebautes Kapitel gewidmet. Dort werden jeweils zunächst die Grundlagen der Mikroresonatoren behandelt, was die Vorstellung der für diese Arbeit besonders wichtigen Ergebnisse anderer Forschungsgruppen mit einschließt. Danach werden jeweils die Herstellungsmethoden der beiden unterschiedlichen Strukturen erklärt. Den größten Raum nehmen dann jeweils die Darstellungen der verschiedenen Messungen und der daraus gewonnenen Ergebnisse ein. Im Kapitel 4 wird die Arbeit zusammengefasst, und die Herstellung und Eigenschaften der beiden Systeme von Mikroresonatoren werden miteinander verglichen.

Kapitel 2

Zweidimensional gekoppelte photonische Punkte

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Präparation und der Untersuchung von großflächig strukturierten, zweidimensional gekoppelten photonischen Punkten vorgestellt werden. Als Grundlage dafür werden im ersten Unterkapitel sowohl die optischen Eigenschaften planarer Halbleiter-Mikroresonatoren beschrieben, als auch einige wichtige Ergebnisse der Arbeiten an lateral strukturierten Mikroresonatoren anderer Forschungsgruppen vorgestellt. Die folgenden Unterkapitel behandeln dann die von uns verwendete Präparationsmethode, unsere Messungen und ihre Ergebnisse. Zum Schluss wird dieser Teil der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

2.1 Grundlagen

2.1.1 Planare Mikroresonatoren

Als Ausgangspunkt für die Herstellung von gekoppelten photonischen Punkten dient ein planarer Mikroresonator, der Einfachheit halber im Folgenden auch Microcavity genannt. Dabei handelt es sich um eine Struktur ganz ähnlich eines Fabry-Pérot-Interferometers: Sie besteht aus zwei Spiegeln und einem Raum zwischen diesen, der den eigentlichen Resonator darstellt. Das Besondere ist, dass die Länge des Resonators in der Größenordnung der Wellenlänge liegt, auf die die Microcavity ausgelegt ist, und dass die Spiegel, statt wie üblich aus Metall, aus mehreren Schichtpaaren zweier dielektrischer Materialien mit unterschiedlichem Brechungsindex bestehen. Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau einer Microcavity.

Ein dielektrischer Spiegel (DBR, engl. *distributed Bragg reflector*) reflektiert genau dann Licht einer bestimmten Wellenlänge λ sehr gut, wenn die Schichtdicken gerade einem Viertel der Wellenlänge in dem jeweiligen dielektrischen

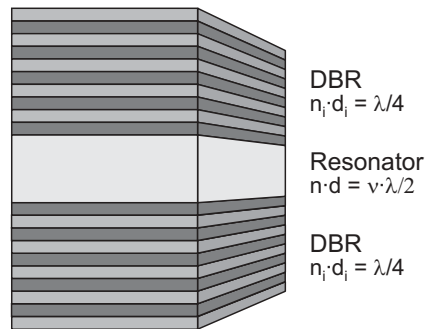


Abb. 2.1: Aufbau einer Microcavity. n_i bezeichnen Brechungsindizes, d_i Schichtdicken, λ die Vakuumwellenlänge, $i \in \{1, 2\}$ und $\nu \in \mathbb{N}$.

Material entsprechen. Die Reflektivität eines DBRs ist umso größer, je mehr Schichtpaare den Spiegel bilden und je unterschiedlicher die Brechungsindizes der Schichten sind. Weiterhin lässt sich zeigen, dass ein DBR nicht nur für die eine bestimmte Wellenlänge λ , sondern für einen ganzen Wellenlängenbereich um λ herum eine hohe Reflektivität besitzt. Dieser Stoppband genannte Bereich ist umso größer, je unterschiedlicher die Brechungsindizes der Schichten sind. [Sve89, Bor93, Bjö95, Kip00]

Hat die Resonatorschicht eine Dicke entsprechend einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge λ im Resonatormaterial, so ist die Microcavity optimal auf λ abgestimmt. Zu beachten ist auch die Feldverteilung innerhalb des Resonators: Schließt auf beiden Seiten der Resonatorschicht jeweils die niedriger brechende Schicht der Spiegel an, so haben stehende Wellen an diesen Grenzflächen Bäuche. Für einen $\lambda/2$ -Resonator bedeutet dies ein Knoten in der Feldverteilung in der Resonatormitte; das Feld eines λ -Resonators dagegen besitzt dort einen Bauch.

Reflektivitäten, Transmissivitäten und Feldverteilungen für Systeme beliebig vieler dielektrischer Schichten lassen sich durch rekursives Lösen der Maxwell-Gleichungen berechnen. Eine Methode dafür ist in [Wol56] angegeben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Computerprogramme, die in [Kip00] erstellt wurden, weiterentwickelt, um optische Eigenschaften von planaren Mikroresonatoren, in die Emitter eingebettet sind, zu berechnen. Die Abbildungen 2.2-2.4 zeigen einige berechnete Eigenschaften einer auf $\lambda = 1000$ nm ausgelegten Microcavity, bestehend aus einem λ -GaAs-Resonator zwischen zwei jeweils 24 Schichtpaare enthaltenden GaAs/AlAs-DBRs.

Abbildung 2.2 (a) zeigt das Reflexionsspektrum der Microcavity für senkrechten Einfall des Lichts. Deutlich erkennbar ist das durch die dielektrischen Spiegel erzeugte Stoppband, in dem die Reflektivität nahe bei Eins liegt. In der Mitte des Stoppbandes, bei einer Wellenlänge von 1000 nm, bricht die Reflektivität als Effekt des Resonators ein. Ein dazu komplementäres Verhalten zeigt das Emissionsspektrum in Abb. 2.2 (b). Hier ist die Intensität außerhalb der Microcavity, emittiert senkrecht zur Spiegeloberfläche, gegen die Wellenlänge dargestellt, wobei im Zentrum des Resonators eine Quelle ebener Wellen mit der Intensität

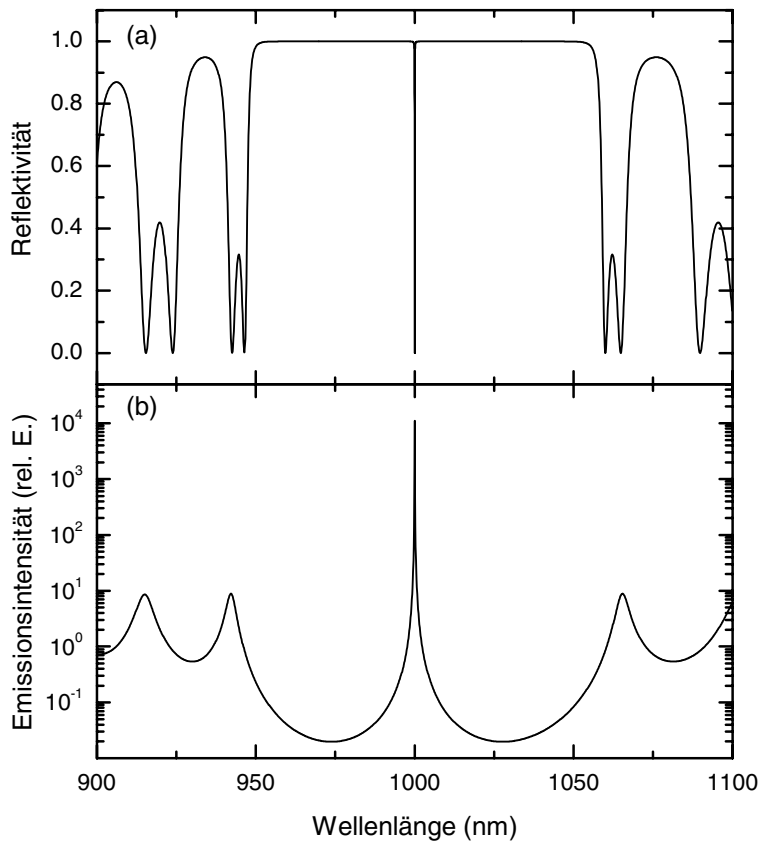


Abb. 2.2: Berechnete Reflexions- und Emissionsspektren einer Microcavity. Für die Emission wurde eine Quelle ebener Wellen mit der Intensität Eins für jede gezeigte Wellenlänge im Zentrum des Resonators angenommen.

Eins für jede gezeigte Wellenlänge angenommen wurde. Es ist die logarithmische Darstellung der Intensität zu beachten. Licht mit 1000 nm Wellenlänge ist in Resonanz mit der Microcavity. Es koppelt an die Cavitymode und seine Intensität außerhalb der Microcavity wird verstärkt. Im Bereich des Stopbandes wird die Emission von Licht stark unterdrückt. Erst an beiden Seiten des Stopbandes emittiert die Microcavity wieder in so genannte Leckmoden (engl. *leaky modes*).

Abbildung 2.3 zeigt die Feldverteilung innerhalb der Microcavity im Resonanzfall. Man erkennt die deutliche Überhöhung der Amplitude des elektrischen Feldes im Zentrum des Resonators. Die Einhüllende der Amplituden innerhalb der Spiegel rechts und links vom Resonator fällt näherungsweise exponentiell ab.

In Abb. 2.4 ist die Winkelabhängigkeit sowohl der Cavity- als auch der benachbarten Leckmoden gezeigt. Mit zunehmendem Detektionswinkel, gemessen zur Probennormalen, nehmen die Wellenlängen der Moden ab. Neben der Cavitymode und den Leckmoden gibt es eine weitere Art Moden, an die Emitter innerhalb der Microcavity koppeln können: so genannte geführte Moden (engl. *guided modes*), hervorgerufen durch Totalreflexion an der Grenzfläche DBR/Luft.

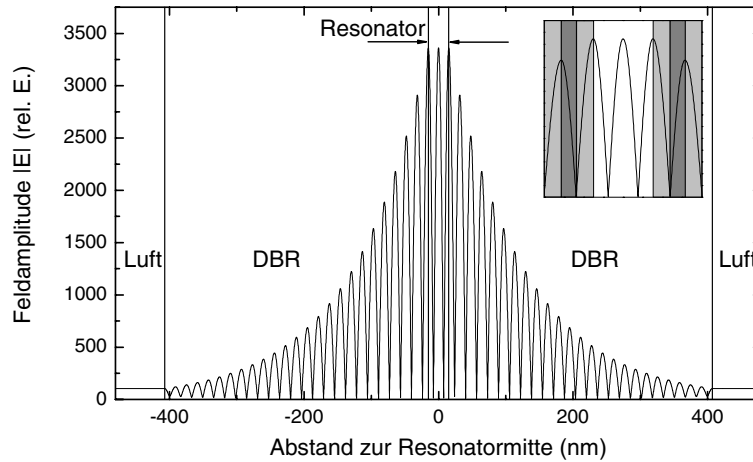


Abb. 2.3: Amplitude des elektrischen Feldes für einen Emitter in Resonanz mit dem Resonator. Im Inset ist der Bereich um den Resonator vergrößert .

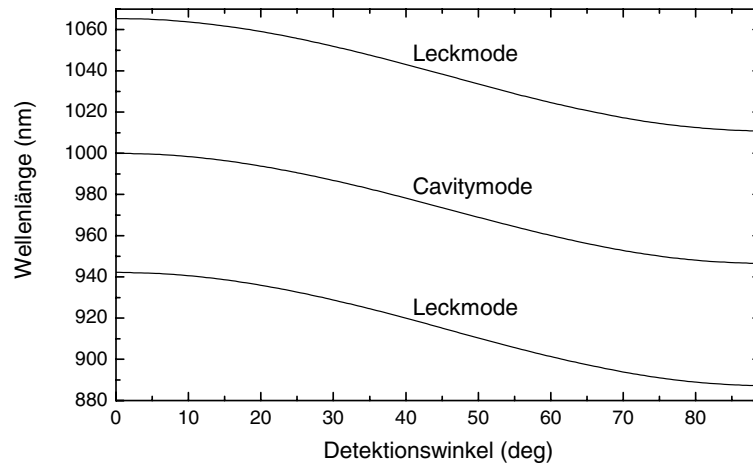


Abb. 2.4: Berechnete Winkelabhängigkeit der Cavitymode.

Für den Übergang von GaAs zu Luft beträgt der Grenzwinkel zur Totalreflexion auf Grund des großen Brechungsindexunterschieds nur etwa 18° . Moden, die mit einem größeren Winkel auf die DBR/Luft-Grenzfläche auftreffen, emittieren kein Licht im Fernfeld außerhalb der Microcavity.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass planare Mikroresonatoren das Abstrahlungsverhalten von Emitttern im Resonator stark verändern: die Emission in die Resonatormode wird stark überhöht, während die Emission für nichtresonante Wellenlängen unterdrückt wird. Diese Effekte lassen sich alleine mit dem wellenartigen Charakter von Licht erklären; in die gezeigten Berechnungen gehen keine quantenelektrodynamischen Effekte ein, wie die Modifikation der spontanen Emissionsrate der Emitter durch den Resonator.

2.1.2 Photonische Atome, Moleküle und Kristalle

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass man Licht mit planaren Mikroresonatoren sehr effektiv in einer Raumrichtung einschließen kann. Einen Einschluss von Licht in allen drei Dimensionen kann man durch laterale Mikrostrukturierung von planaren Microcavities erreichen. Der seitliche Einschluss wird dann nicht etwa durch weitere hochreflektierende DBRs hervorgerufen, sondern einfach durch den relativ großen Unterschied der Brechungsindizes von Halbleiter und Luft. In solchen Strukturen sind dann die elektromagnetischen Moden vollständig quantisiert, ähnlich wie elektronische Zustände in Halbleiter-Quantenpunkten oder Atomen. Aus diesem Grund werden diese Mikroresonatoren auch photonische Punkte oder photonische Atome genannt, die dann zu photonischen Molekülen und Kristallen gekoppelt werden können.

Ende der 1980er Jahre wurden lateral strukturierte Mikroresonatoren zuerst von Jewell *et al.* im Hinblick auf die Herstellung optischer Gates und oberflächenemittierender Laser realisiert [Jew87, Jew89a, Jew89b]. Einige Zeit später wurde dann in zwei Arbeiten an etwas unterschiedlichen Systemen die Modenstruktur dieser dreidimensionalen Mikroresonatoren genauer untersucht. In beiden Fällen wurde die Emission einer optisch aktiven Schicht detektiert, die in das Zentrum des vor der Strukturierung planaren Resonators eingebracht war. Gérard *et al.* untersuchten säulenartige Strukturen mit rundem Querschnitt, in deren Resonator selbstorganisiert gewachsene InAs-Quantenpunkte eingebracht waren [Gér96], während Reithmaier *et al.* Strukturen mit quadratischem Querschnitt und InGaAs/GaAs-Quantenfilmen als Emittter untersuchten [Rei97]. Beide Systeme wurden im Folgenden intensiv weiter erforscht. So konnte zuerst an den Quantenpunkte enthaltenden Strukturen die Erhöhung der spontanen Emissionsrate der atomähnlichen Emittter in die Cavitymode, also der Purcell-Effekt [Pur46], gezeigt werden [Gér98, Gér99]. Von der Vielzahl der weiteren Arbeiten über Quantenfilme enthaltende Strukturen [Ohn97, Röh97, Gut98, Bay98, Gut99, Bay99, Gut01, Bay01, Zhu02] sollen hier im Wesentlichen zwei Publikationen [Bay98, Bay99] näher vorgestellt werden, die sich mit gekoppelten photonischen Punkten befassen und die für diese Arbeit von besonderer Bedeutung sind. (Dabei wird im Folgenden, wie in den Originalarbeiten, von „photonischen Punkten“ die Rede sein, obwohl „photonische Atome“ genauso richtig wäre.)

Abbildung 2.5 zeigt eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (REM) eines photonischen Moleküls bestehend aus zwei gekoppelten photonischen Punkten von Bayer *et al.* [Bay98]. Die ursprünglich planare Microcavity bestand aus 17 GaAs/AlAs- $\lambda/4$ -Schichtpaaren als oberer DBR, einem GaAs- λ -Resonator mit einem InGaAs-Quantenfilm im Zentrum und 21 AlAs/GaAs- $\lambda/4$ -Schichtpaaren als unterer DBR. Für die Strukturierung wurde auf der Probe mit Elektronenstrahl-lithographie eine Maske definiert, die dann mittels eines reaktiven Ionenätzverfahrens in die Probe übertragen wurde. Auf dem Bild erkennt man, dass sowohl durch den oberen DBR als auch durch den eigentlichen Resonator bis in die ersten