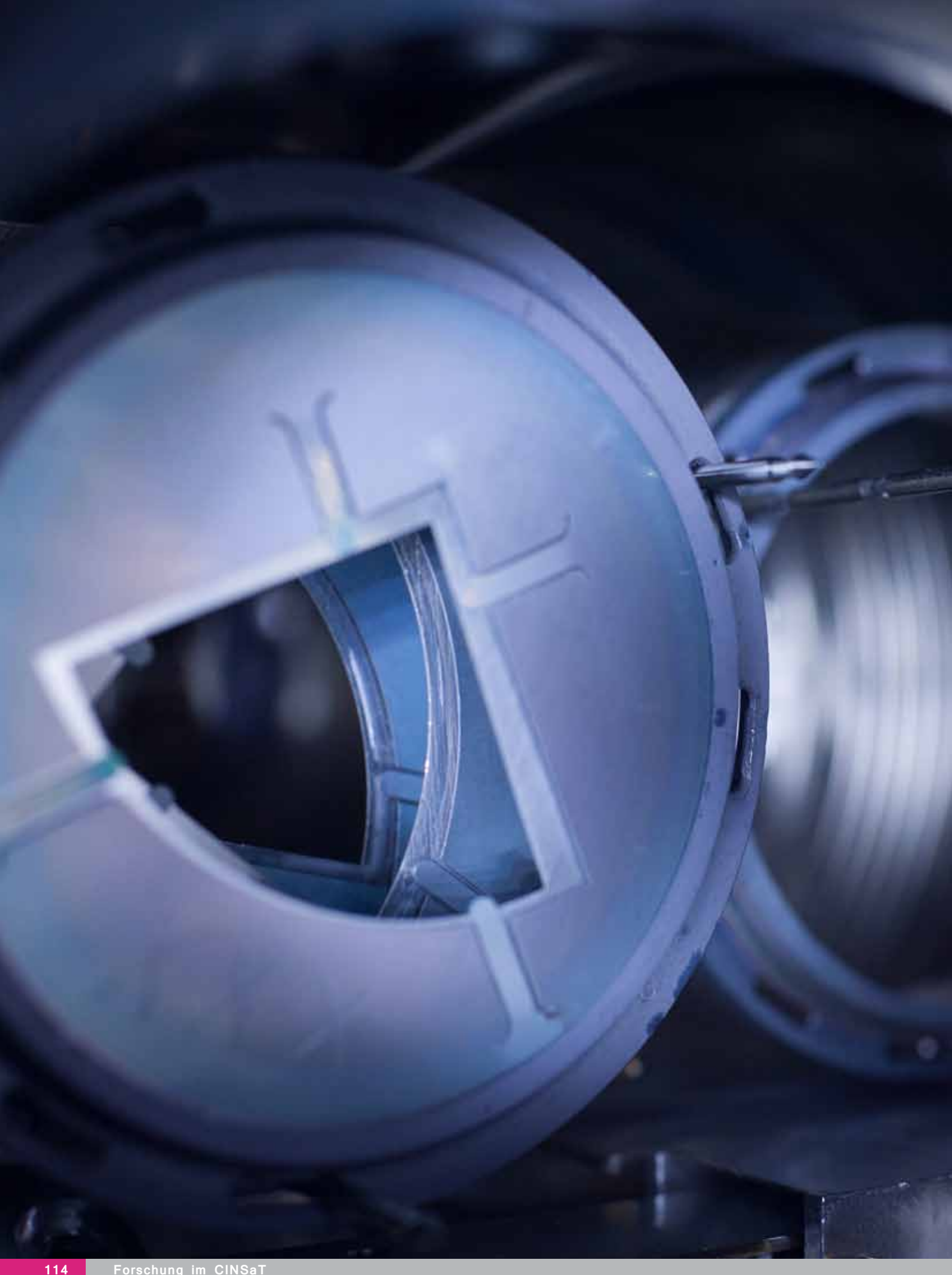


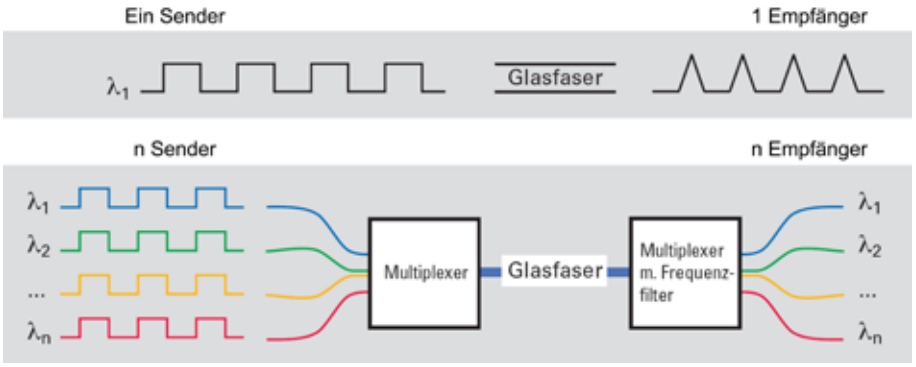
Reithmaier schafft das „photon on demand“

Der weltweite Datenstrom schwillt an. Immer schneller sollen immer mehr digitalisierte Informationen rund um den Globus gesandt werden. War vor wenigen Jahren ein ISDN-Anschluss noch eine Besonderheit, wird der DSL-Anschluss heute zum Standard. Diesen steten Wandel hin zum „immer mehr und immer schneller“ treibt Professor Dr. Johann Peter Reithmaier voran. Er ist Direktor des Instituts für Nanotechnologie und Analytik (INA), Leiter der Technischen Physik an der Universität Kassel und Mitglied im Center of Interdisciplinary Nanostructure Science and Technology (CINSaT). In der Forschung auf dem Weg zum „photon on demand“ setzt er Meilensteine.

Zusammen mit seinen Mitarbeitern und Studenten erzeugt und verändert er Nanostrukturen in verschiedenen Materialien, wie zum Beispiel Silizium (Si), Galliumarsenid (GaAs), Indiumphosphid (InP) oder auch Diamant und Graphit. Reithmaier will vor allem die optischen Eigenschaften dieser Materialien für Anwendungen in der Informationstechnologie, Telekommunikation oder Sensorik beeinflussen, indem die Wissenschaftler die Geometrien der Nanostrukturen oder die Komponenten der Bauteile mit atomarer Präzision zum Beispiel in Länge, Höhe und Breite verändern, ohne die chemischen oder physikalischen Eigenschaften der Materialien zu verändern. Reithmaier entwickelt zum Beispiel Halbleiter-Laser aus diesen neuartigen nanostrukturierten Materialien, welche Daten - übersetzt in optische Signale - zehn Mal schneller als bisher übermitteln können, oder optische Verstärker, die mehrere Wellenlängen gleichzeitig verstärken können. Er arbeitet an neuartigen temperaturstabilen Hochleistungslasern zum optischen Pumpen von Glasfaserlasern, die ohne Kühlung auskommen, sowie von Lasern, die in der Gassensorik eingesetzt werden können. Reithmaier entwickelt schließlich auch ultimativ miniaturisierte Lichtemitter, die auf Verlangen nur noch ein einzelnes Lichtteilchen (Photonen) aussenden und in der Quantenkryptographie oder Quanteninformationsverarbeitung eingesetzt werden sollen.

Wellenlängenfilter werden die elektronische Post zielgenau zustellen

Reithmaier sieht Breitbandkommunikationsnetze auf der Basis von optischen Glasfaseranschlüssen und Wellenlängenmulitplexverfahren kommen, die lokale Netzwerke in Häusern, Unternehmen oder Institutionen erschließen werden, und optoelektronische Wellenlängenfilter, welche die elektronische Post zielgenau ihren Adressaten erreichen lassen. Entsprechende Konzepte wurden bereits vor einigen Jahren entwickelt, jedoch fehlen noch Komponenten, die eine kostengünstige Implementation der hochbitratigen Systeme mit zum Beispiel 10 GBit/s für den Endverbraucher ermöglichen. Nanostrukturierte optische Materialien, sagt Reithmaier, haben das



Prinzip einer optischen Digitalübertragung über eine Glasfaserstrecke (oben) bzw. einer Multiwellenlängenübertragung (WDM-Verfahren, unten), bei der die Wellenlänge selbst als Informationsträger für die Empfängeradressierung verwendet wird. Beim WDM-Verfahren wird ebenfalls nur eine Glasfaser benötigt, da sich die verschiedenen Wellenlängen gegenseitig nicht beeinflussen.

Prinzip des selbstorganisierten Wachstums von Quantenpunkten. Durch Abscheidung von InAs mit größerer Gitterkonstante im Vergleich zum GaAs-Substrat bildet sich eine hoch verspannte Benetzungsschicht. Überschreitet die Schichtdicke einen bestimmten Wert (z.B. 1,7 Monolagen bei InAs auf GaAs) wird die eingebaute Verspannungsenergie durch Ausweichen in die dritte Dimension abgebaut. Es entstehen Wachstumsinseln mit Durchmessern von 10-20 nm und Höhen von typisch 5 nm. Wegen den kleinen Abmessungen zeigen diese Nanostrukturen Quantenpunkteigenschaften.

Potential, durch zusätzliche Freiheitsgrade in der Herstellung neuartige Eigenschaften oder die Kombination von verschiedene Eigenschaften überhaupt erst oder wesentlich kostengünstiger realisieren zu können. Er zielt damit auf die Erschließung zukünftiger Massenmärkte in optischen Technologien.

Mit dem Datenstrom wachsen die Anforderungen an die Netze

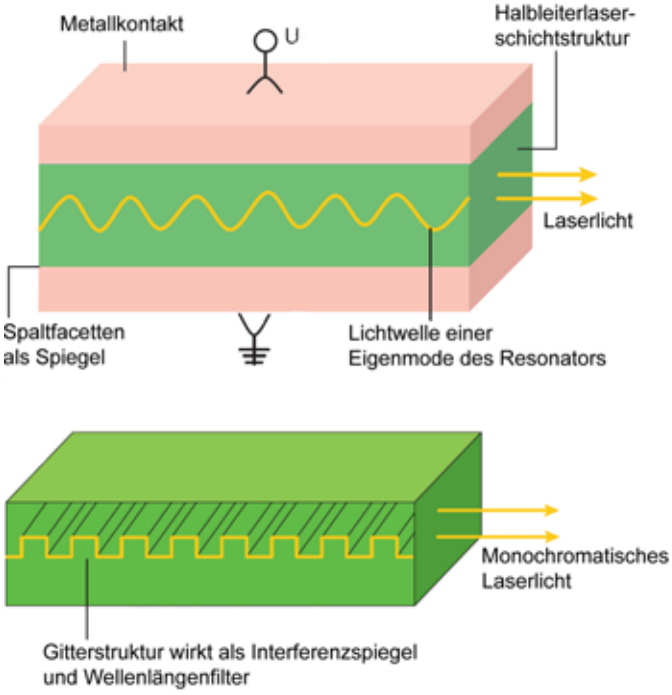
Mit dem exponentiellen Wachstum der Datenströme wachsen die Anforderungen an die Netze in den Haushalten und Unternehmen, aber auch jene, die an die „Backbone“-Netze gestellt werden, denn die Daten müssen die Meere überspringen, um die Kontinente zu erreichen. Schon vor dem jüngsten Jahrtausendwechsel hatten die Fachleute erkannt, dass es nicht genügte, die Technologie des Datentransfers zu verbessern, sondern dass es einer neuen Technik bedurfte.

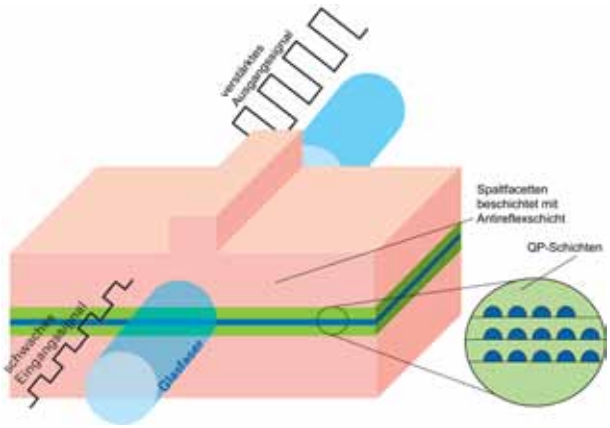
Oben: Stark vereinfachter Aufbau eines Halbleiterlasers. Durch die beiden Spaltfacetten wird ein optischer Resonator gebildet, der nur bestimmte Moden (stehende Wellen) erlaubt. Der Laser wird elektrisch über zwei Metallkontakte gepumpt. Die Laseremission erfolgt über die Spaltfacetten.
Unten: Schema einer Laserstruktur mit eingebauter Gitterstruktur, die das Licht über Mehrfachinterferenz zurückkoppelt. Das Gitter ersetzt damit die Spiegel eines Resonators und bewirkt über die Gitterperiode zusätzlich eine Selektion einer bestimmten Wellenlänge.

„Wavelength Division Multiplexing“ (WDM), das Wellenlängenmultiplexverfahren, wurde entwickelt. Statt Licht aus einem modulierenden Laser mit nur einer Wellenlänge durch ein Glasfaserkabel zu schicken, um das optische Signal (Licht an / Licht aus) am anderen Ende der Leitung wieder in ein elektrisches umzusetzen, wurde Licht verschiedener Wellenlängen verwandt. Die Information wurde auf verschiedene Wellenlängen-Kanäle verteilt. Die Lichtsignale störten sich untereinander nicht. Die Übertragungskapazität stieg innerhalb weniger Jahre um den Faktor 1000 auf 10 Terabit je Sekunde und überstieg im Jahr 2000 den Bedarf bei weitem.

Ein neues Halbleitermaterial für den gesamten infraroten Spektralbereich

Den Wissenschaftlern stellte sich die Herausforderung, optoelektronische Bauelemente, wie Laser und optische Verstärker, zu entwickeln, die eine große Bandbreite von Licht mit unterschiedlichen Wellenlängen generieren oder verstärken konnten. Bisher wurde in solchen Systemen für jede verwendete Wellenlänge ein individueller Laser eingesetzt und für jedes Frequenzband ein speziell abgestimmter optischer Verstärker. Das ließ die Systeme sehr teuer werden. Reithmaier arbeitete mit seiner Forschergruppe noch am Mikrostrukturlabor der Universität Würzburg sowie in Kooperation mit europäischen Universitäten und Industriefirmen im Rahmen eines internationalen





Prinzip eines optischen Halbleiterverstärkers (SOA). Das schwache über eine Glasfaser eingekoppelte Signal wird über den elektrisch gepumpten Halbleiter verstärkt und wieder in eine Glasfaser eingekoppelt. Zur Vermeidung von Rückreflexionen und der Bildung eines optischen Resonators sind die Spaltfacetten mit Antireflexschichten versehen. Bei einem Quantenpunkt- SOA besteht die aktive Zone aus Quantenpunktschichten.

EU-Projektes, das er koordinierte, als er begann, ein künstliches nanostrukturiertes Halbleitermaterial zu entwickeln, das die optische Verstärkungsbandbreite um den Faktor sechs von bisher 50 bis auf 300 Nanometer vergrößerte. Mit diesem neuartigen Material kann der infrarote Spektralbereich mit einer Wellenlänge von 1,4 bis 1,7 Mikrometer abgedeckt werden. Damit könnten die meisten in der optischen Telekommunikation eingesetzten Wellenlängen mit einem Material generiert oder verstärkt werden.

Reithmaier läßt Elektronen und Löcher kontrolliert rekombinieren

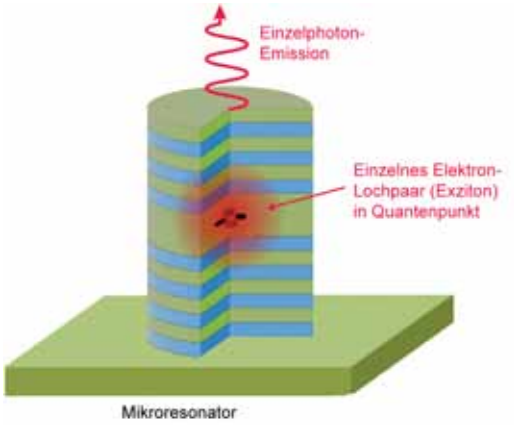
Reithmaier entwickelt dazu Materialien im Nanometermaßstab, in denen Ladungsträger (Elektronen und Löcher) kontrolliert rekombinieren. Er läßt zum Beispiel Gallium und Arsen in einer sogenannten „Molekularstrahl-Epitaxieanlage" verdampfen, das auf einer geheizten Galliumarsenid-(GaAs-)Substratoberfläche kondensiert und sich als gleichmäßige Gitterstruktur Atom für Atom abscheidet. Dies geschieht mit höchsten Reinheitsanforderungen bei Restgasdrücken im Bereich von < 10^{-10} mbar in Ultrahochvakuumkammern. Ersetzt man einen Teil des Galliums während der Abscheidung durch Indium, einer Atomsorte mit größerem Atomdurchmesser, so wird Gallium-Indiumarsenid (GaInAs) gebildet, das abhängig vom Indiumanteil eine größere Gitterkonstante besitzt als GaAs. Dann können sich die Atome ab einer bestimmten Schichtdicke nicht mehr in die vorgegebene Ordnung in der Fläche einordnen, sondern weichen in die dritte Dimension aus.

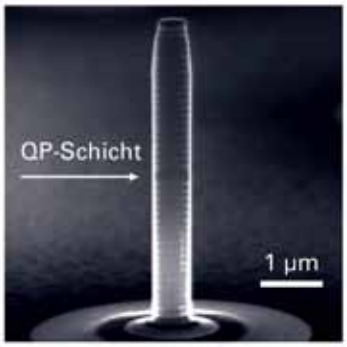
Auf diese Weise lassen die Wissenschaftler aus einigen Millionen Atomen Wachstumsinseln erstehen, die schließlich die sogenannten Quantenpunkte bilden. Die Quantenpunkte sind nicht identisch und ihre Lage ist nicht regelmäßig. Je nach Mischung der Ausgangsstoffe sind sie in Größe und Position statistisch verteilt. Die Bandlücke wird größer, je kleiner die Systeme sind, denn in einem kleinen Punkt schwingt das Elektron schneller als in einem großen Punkt, so wie eine kurze Saite auf einem Streichinstrument schneller und energiereicher schwingt als eine lange Saite. Indem Reithmaier die Größe des Quantenpunktes variiert, verstellt er die Übergangsenergie für die Rekombination von Elektron und Loch. Damit wiederum bestimmt er die freigesetzte Emissionsenergie, aus der sich unmittelbar die Frequenz beziehungsweise die Wellenlänge des Lichtes ergeben.

Variable Quantenpunkte als Leuchtdiode, Laser oder optischer Verstärker

Dieses „optisch aktive Material" kann Basis für eine Leuchtdiode, einen Halbleiter-Laser und

Schematische Darstellung der spektralen optischen Verstärkungsfunktion einer Quantenfilm- (rot) bzw. Quantenpunktstruktur (blau). Bei Quantenpunkten können höhere Übergänge wesentlich zur Verstärkung beitragen, da aufgrund der geringeren Materialdichte der Grundübergang leichter gesättigt werden kann (Auffülleffekt). Bei Quantenfilmen dominiert nur der Grundübergang. Durch Einfluss auf die Quantenpunktgeometrie (Größe, Dichte, etc.) kann die spektrale Verstärkungsfunktion speziell auf bestimmte Anforderungen angepasst werden.





Schema (links) und Rasterelektronenmikroskopaufnahme (rechts) eines Einzelphotonenemitters auf der Basis einer vertikal emittierenden Mikroresonatorsäulenstruktur mit eingeschlossenem Quantenpunkt.

einen optischen Verstärker sein. Das Prinzip ist stets dasselbe: Eine Spannung wird angelegt und Elektronen durchfließen das Material. In den Quantenpunkten rekombinieren Elektronen und Löcher und setzen damit Energie frei. Während eine Leuchtdiode Licht vieler Wellenlängen in alle Richtungen abgibt, erzeugt ein Laser kohärentes, gerichtetes, monochromatisches Licht. Um das Licht zu verstärken, wird es im Laser mehrfach durch das verstärkende Material geleitet. Dies geschieht zum Beispiel durch zwei Spiegel, die gegenüberliegend das aktive Material umgeben und einen optischen Resonator bilden. Auch Gitterstrukturen, die nötig sind, um nur Licht einer bestimmten Wellenlänge passieren zu lassen, vermögen die Funktion der Spiegel zu übernehmen.

CINSaT-Forscher schaffen die Voraussetzung für ungekühlte Pumpmodule

Der Quantenhochleistungslaser hat Quantenpunkte unterschiedlicher Größe. Die großen Punkte strahlen Lichtquanten mit weniger Energie ab, das Licht ist also relativ langwellig. Die kleineren Punkte geben Lichtquanten mit höherer Energie ab. Dieses Licht ist kurzwelliger. Wird eine Spannung angelegt, füllen sich zunächst die großen Quantenpunkte. Die kleineren bleiben frei. Erhitzt sich dieser Laser, nehmen die Verluste zu und der Laser muss stärker gepumpt werden, um die Verluste durch höhere optische Verstärkung zu kompensieren. Durch den größeren Strom werden mehr Elektronen nachgeliefert und die kleineren Quantenpunkte beginnen sich ebenfalls zu füllen. Dies führt zum einen zu einer höheren optischen Verstärkung, doch zum anderen zu einer Verschiebung des Maximums der optischen Verstärkung, da im wesentlichen nur die höheren Übergangsenergien, also die kleinern Quantenpunkte, zur Verstärkung beitragen. Dieser Effekt verläuft entgegengesetzt der normalerweise zu beobachtenden Zunahme der Wellenlänge bei konventionellen Halbleitermaterialien. Damit kann dieser Auffülleffekt im Quantenpunktlasermaterial die Wellenlängenverschiebung intern kompensieren, sofern der Auffülleffekt richtig abgestimmt wird. Dies ist mittlerweile den Wissenschaftlern in Reithmaiers Gruppe gelungen. Damit können sie Laser herstellen, die gegenüber bisherigen Lasern eine bis zum Faktor 3,5 höhere Wellenlängenstabilität zeigen. Einem Einsatz in ungekühlte Pumpmodule steht damit nichts mehr im Wege, und laufende Forschungen zielen auf die Realisierung solcher Systeme in einem weiteren EU-Forschungsprojekt.

Photon on demand

Reithmaier hat mit der Entwicklung von Einzelphotonenquellen noch ein weiteres Forschungsziel vor Augen, das im Vergleich zu Quantenpunkthochleistungslasern genau in entgegengesetzter Richtung liegt. Mit einem einzelnen Photon will er die geringstmöglichste Lichtleistung eines Lichtemitters erzielen, während der Emissionszeitpunkt und die Zahl der Photonen, nämlich genau eines, vollkommen kontrollierbar sein sollen. Reithmaier will das „photon on demand“. Solche neuartigen künstlichen Lichtquellen sind zentrale Komponenten der optischen Übertragung von sogenannten Quantenschlüsseln über Glasfasern oder auf dem Weg zur Realisierung von Quantencomputern. In beiden Anwendungen nutzen die Wissenschaftler die grundlegenden Eigenschaften der Quantenmechanik, um zum Beispiel abhörsicher Daten zu übertragen oder neuartige Computer zu bauen. Dieses Forschungsfeld gilt prinzipiell der ultimativen Miniaturisierung optolektronischer Bauteile, da hier nur noch mit einzelnen Photonen und Elektronen

gearbeitet wird. Mit weniger als einem Photon oder einem Elektron ist eine Optik oder Elektronik nicht mehr vorstellbar. Der Forschergruppe gelang es erstmals, die kohärente Kopplung von einem Photon mit einem elektronischen Quantenpunktzustand in einer Mikrokavität zu demonstrieren. Dieses Grundlagenexperiment ist ein Meilenstein auf dem Weg zur Realisierung künftiger Quanteninformationssysteme auf der Basis nanophotonischer Komponenten in miniaturisier- und skalierbaren Festkörpersystemen..

Prof. Dr. Johann P. Reithmaier

Prof. Dr. Johann Reithmaier, Jahrgang 1960, hat sein Physikstudium an der Technischen Universität München 1987 mit einer Diplomarbeit über Halbleiterlaser abgeschlossen. Er begann im gleichen Jahr in den zentralen Forschungslaboratorien der Siemens AG in München mit seiner Promotionsarbeit über optische Eigenschaften von elastisch verspannten Halbleiterheterostrukturen hergestellt mit Molekularstrahlepitaxie, die in Zusammenarbeit mit dem Walter-Schottky Institut an der TU München 1990 abgeschlossen wurde. Darauf folgte ein Postdoc-Aufenthalt am IBM-Forschungslabor in Rüschlikon, Schweiz. 1992 ging Reithmaier wieder zurück nach Deutschland an die Universität Würzburg, wo er maßgeblich beteiligt war am Aufbau des Mikrostrukturlabors der Universität Würzburg. Er baute dort eine Forschergruppe auf mit dem Schwerpunkt „nanostrukturierte Halbleitermaterialien und deren Anwendung in optoelektronischen Bauelementen“. 1997 folgte die Habilitation. 2003-2004 wurde er auf eine C3-Vertretungsprofessur berufen und 2004 zum außerplanmäßigen Professor ernannt. 2005 erfolgte der Ruf an die Universität Kassel. Er ist seit Mai 2005 Leiter des Fachgebiets Technische Physik und Direktor des Instituts für Nanostrukturtechnologie und Analytik. Seit 2005 ist er auch Mitglied im CINSaT. Die aktuellen Forschungsschwerpunkte von Herrn Reithmaier und seinem Team, das durch eine Reihe von EU, BmBF und DFG Forschungsprojekten gefördert wird, liegen im Bereich der Entwicklung neuer Nanostrukturierungstechnologien auf dem Gebiet der Halbleiter und deren Anwendung in der Optoelektronik, Sensorik, Mikrosystemtechnologie, Nanophotonik und Quanteninformationsverarbeitung.