

Von Quantenpunkten zu Quantentechnologien

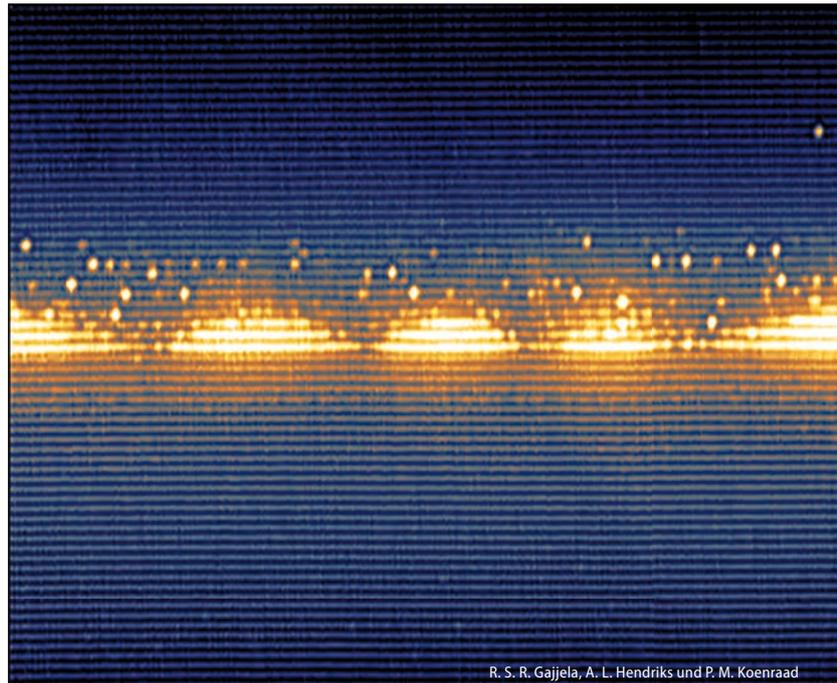
Quantentechnologien ermöglichen Durchbrüche bei Halbleiter-Bauelementen.

Dieter Bimberg

Die Eigenschaften elektronisch nulldimensionaler Quantenpunkte in Halbleiter-Heterostrukturen unterscheiden sich fundamental von jenen in höherdimensionalen Strukturen wie Quantengraben. In Quantenpunkten ist die Energie von Ladungsträgern keine Funktion des Impulses. Ihre Eigenschaften gleichen jenen von Atomen, die in einer dielektrischen Matrix eingebettet sind. Basierend auf Gasphasen- oder Molekularstrahlepitaxie wurden in den letzten Jahren photonische und elektronische Bauelemente entwickelt, die völlig neue Anwendungen ermöglichen. Dazu gehören Quantenkryptographie, neuartige nichtflüchtige Speicher und ein energieeffizientes, hochbitratiges Internet.

Das Zeitalter der Informationsgesellschaft ab Mitte des 19. Jahrhunderts begann mit der Entwicklung siliziumbasierter Verbindungen und Technologien. Die Herstellung integrierter elektronischer Schaltkreise (Si-ICs) begann vor etwa 60 Jahren. Zu ihren ersten kommerziellen Anwendungen gehörten Hörgeräte. Heute sind siliziumbasierte integrierte Schaltkreise Bestandteil fast aller Alltagsgegenstände und Grundlage der Informationsgesellschaft.

Verfahren wie Molekularstrahlepitaxie (MBE) oder Gasphasenepitaxie (MOCVD) zur Herstellung von Materialien, deren Ausdehnung in allen drei Raumdimensionen nur wenige Nanometer beträgt, also von „nulldimensionalen“ Quantenpunkten, und deren Einbettung in andere Materialien, eröffnen heute völlig neue Möglichkeiten, quantenmechanische Effekte einzusetzen. Ziel dabei ist es, elektronische und damit auch optische und elektrische Eigenschaften komplexer Strukturen gezielt zu ändern [1]. Diese Eigenschaften hängen von der Form und Größe der Quantenpunkte ab. Deren Ausdehnung in allen drei Raumrichtungen sollte unter der De-Broglie-Wellenlänge der Ladungsträger liegen, damit die Quantenmechanik dominiert. Quantenpunkte ermöglichen neuartige elektronische und photonische Bauelemente. Drei Beispiele hierfür, die auf einem, wenigen und sehr vielen Quantenpunkten basieren, werden unten beschrieben.



R. S. R. Gajjela, A. L. Hendriks und P. M. Koenraad

Abb. 1 Diese Aufnahme mittels Querschnitts-Rastertunnelmikroskopie zeigt GaSb/GaAs/GaP-Quantenpunkte, die mithilfe der Gasphasenepitaxie an der TU Berlin gewachsen wurden.

Selbstorganisation von Quantenpunkten

Die Entdeckung neuer physikalischer Effekte in den einfachsten niederdimensionalen Halbleiterstrukturen – zweidimensionalen Quantengraben – und deren Nutzung für Halbleiterlaser geht wesentlich auf die Arbeiten von zwei Physikern bei den Bell Labs zurück. Ray Dingle und Charles Henry reichten 1976 ein Patent über Quantengrabenlaser ein. Dabei beschrieben sie als Vorteile der reduzierten Dimensionalität unter anderem eine verringerte Schwellstromdichte, bei der die Laseremission einsetzt. Sie zeigten, wie sich die Zustandsdichte von Elektronen beim Übergang von drei- zu zwei- und schließlich eindimensionalen Strukturen ändert. Diese Änderungen gelten als bestimmender Faktor für alle Eigenschaften des Materials und deren Bauelemente.

Erst viel später betrachteten zwei japanische Gruppen an der Universität Tokio und am Tokyo Institute of Techno-

logy (TIT) nulldimensionale Strukturen. Die Gruppe um Suematsu am TIT berechnete 1986, dass sich der Materialgewinn um einen Faktor 20 vergrößert und die Schwellstromdichte gleichermaßen für Quantenpunkt-basierte Laser sinkt, die auf InP- oder GaAs-basierten Heterostrukturen beruhen. Diese theoretischen Betrachtungen gingen von Heterostrukturen aus, deren unterschiedliche Schichten identische Gitterkonstanten besitzen. Vor dreißig Jahren galt dies als Voraussetzung für defektfreie Strukturen und ist bis heute Bestandteil der Technologie vieler photonischer Bauelemente. In den darauffolgenden acht Jahren gab es enorme Anstrengungen, um die Vorteile derartiger Quantenpunkt-basierter Laser zu demonstrieren. Dies gelang auf Basis der seinerzeit verwendeten Technologien aus verschiedenen Gründen nicht, woraufhin die internationalen Aktivitäten rasch abklangen [1].

Selbstorganisiertes Wachstum als Schlüssel

Oberflächenphysiker klassifizieren die Wachstumsmodi für das kohärente Wachstum eines Materials auf einem zweiten Material in drei Gruppen. Für den Fall identischer Gitterkonstanten, zum Beispiel AlGaAs auf GaAs, ergibt sich häufig ein zweidimensionales Wachstum Monolage auf Monolage – mit Stufen und Rauigkeiten. Bei unterschiedlichen Gitterkonstanten können kohärent dreidimensionale Cluster wachsen. Alternativ kann bei Strukturen mit un-

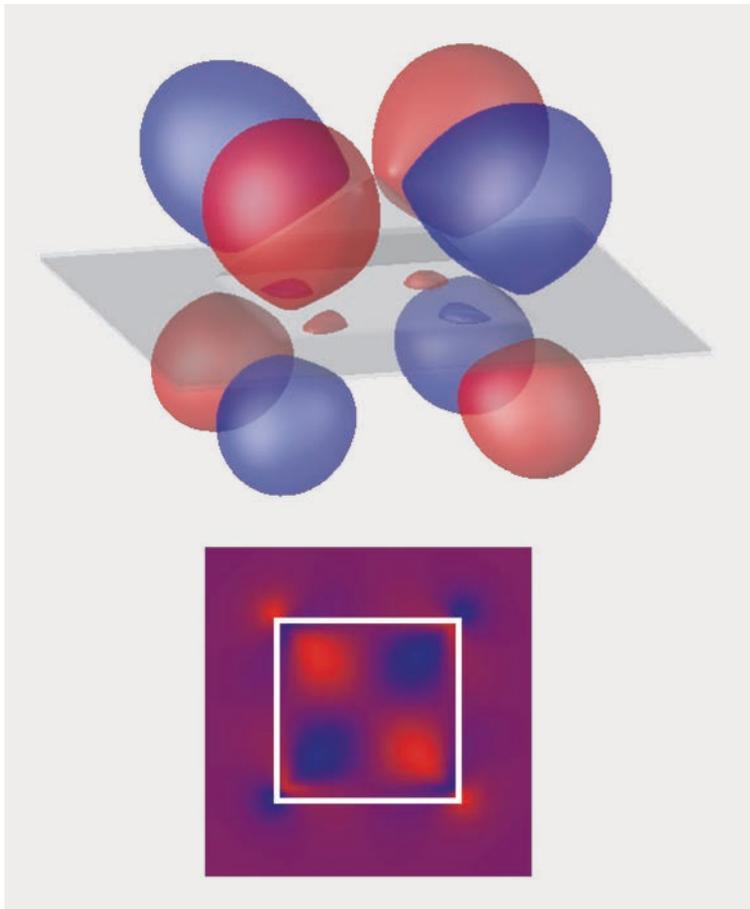


Abb. 2 Die piezoelektrischen Isopotentialoberflächen für ± 50 meV (blau bzw. rot) einer vierseitigen (InGa)As/GaAs-Quantenpyramide zeigen deutlich die Reduktion auf zweizählige Symmetrie.

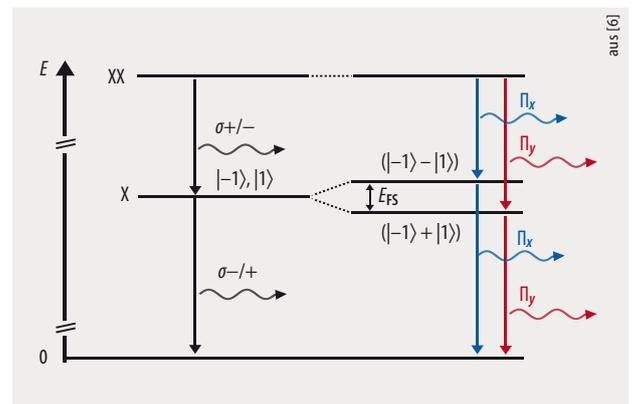


Abb. 3 Rekombinationskaskade des Biexzitons und des Exzitons eines InAs/GaAs-Quantenpunkts ohne (links) und mit (rechts) piezoelektrischen Effekten. E_{FS} ist die Feinstrukturaufspaltung, x und y zeigen die Richtung der linearen Polarisation an.

terschiedlichen Gitterkonstanten im Stranski-Krastanov-Wachstumsmodus zuerst eine (ebenfalls raue) und wenige Monolagen dicke Benetzungsschicht entstehen, auf der dann dreidimensionale Cluster wachsen. Die theoretische Beschreibung dieses Wachstums ist komplex [2], da sowohl Gitterkonstanten-Fehlanpassung mit der elastisch anisotropen Wachstumsoberfläche als auch kanteninduzierte Verspannungen vorliegen. Zudem ändern die Verspannungen die Oberflächenrekonstruktion und bewirken eine Renormalisation der Oberflächenenergien der Inseln und der Benetzungsschicht. Für die Dynamik des Wachstums bei realen Temperaturen sind kinetische Effekte wichtig [2]. Die experimentell in meiner Arbeitsgruppe erstmals identifizierte und dann theoretisch bestätigte Selbstorganisation an verspannten Oberflächen setzt voraus, dass Atome an der Oberfläche ausreichend beweglich sind, was bei den typischen Wachstumstemperaturen der Quantenpunkte von einigen hundert Grad der Fall ist.

Aufnahmen mit dem Transmissionselektronenmikroskop (TEM) einer einzelnen Schicht von (InGa)As/GaAs-Quantenpunkten [1] zeigen die theoretisch vorhergesagte Pyramidenstruktur [2]. Die einander selbstähnlichen Quantenpunkte sind in einem quadratischen Muster angeordnet. Die Kanten der Grundfläche zeigen entlang der [100]- und [010]-Richtungen, da alle III-V-Verbindungen eine elastisch anisotrope (001)-Oberfläche besitzen. Eine Pyramidenform der Quantenpunkte in einer Einzelschicht haben wir sowohl für MOCVD als auch MBE-Wachstum von (InGa)As/GaAs-Quantenpunkten mittels Querschnitts-TEM und -Tunnelspektroskopie nachgewiesen. Die Form prägt dabei die elektronischen Eigenschaften.

Querschnitts-TEM-Aufnahmen gestapelter Quantenpunktschichten zeigen, dass sich die Quantenpunkte in den Schichten aufgrund der langreichweitigen elastischen Verspannungen vollständig defektfrei übereinander anordnen lassen. Dies ist von größter Bedeutung für unterschiedlichste Varianten Quantenpunkt-basierter Diodenlaser, die je nach Anwendung elektronisch gekoppelt oder ungekoppelt zu wachsen sind. Der überlegene Materialgewinn einer Einzelschicht [1] lässt sich durch die defektfreie Sta-

pelung in einen modalen Gewinn, der größer als die Verluste ist, umsetzen. Dies erklärt die real von uns gefundene geringste Dichte des Schwellenstroms aller Diodenlaser und die sonst unerreichte Effizienz bei der Umwandlung elektrischer in optische Energie.

Das verspannungsinduzierte selbstorganisierte Wachstum von Quantenpunkten ist universell. GaN-basierte Laser, die im Sichtbaren emittieren, besitzen Quantenpunkte als aktive Schichten. Exotische Beispiele sind die wenig erforschten InAs/Si-Quantenpunkte für die Silizium-Photonik oder GaSb-Quantenpunkte auf (AlGa)P mit GaAs-Zwischenschichten für neuartige Nanoflashspeicher, die weiter unten beschrieben sind. Bei einem GaSb/GaAs/GaP-Quantenpunkt, der mittels Gasphasenepitaxie hergestellt wurde, sind einander benachbarte Oberflächen der Quantenpunktpyramiden inäquivalent zueinander (**Abb. 1**). Dies ist von entscheidender Bedeutung für die im nächsten Abschnitt diskutierten elektronischen Eigenschaften: Quantenpunkte vierzähliger pyramidaler Form besitzen keine vierzählige, sondern nur eine zwei-zählige Symmetrie der elektronischen Eigenschaften [3].

Exzitonen in Quantenpunkten

Für jegliche quantitative Modellierung elektronischer und exzitonischer Eigenschaften von Quantenpunkten ist es essenziell, deren Form und Zusammensetzung auf atomarer Ebene zu kennen. Eine Kombination von Draufsicht- und Querschnitts-Transmissionslektronenmikroskopie zusammen mit Rastertunnelmikroskopie stellt diese Daten zur Verfügung. So enthüllte die Querschnitts-Rastertunnel-spektroskopie beispielsweise, dass die Konzentration von Indium in (InGa)As-Quantenpunkten von unten nach oben zunimmt.

Basierend auf diesen Mikroskopie-Daten berechneten wir das Spannungsfeld eingebetteter Quantenpunkte mittels Kontinuumstheorie. Die piezoelektrischen Potentiale inklusive quadratischer Effekte lassen sich daraus ableiten (**Abb. 2**) [3, 9]. Unsere erste physikalisch durchsichtige quantitative Berechnung der elektronischen Struktur der Quantenpunkte beruhte auf einem numerischen Bandstrukturmodell (8-Band-k-p-Theorie) unter Berücksichtigung der piezoelektrischen Effekte. Die wichtigsten Ergebnisse gelten universell für alle III-V-Quantenpunkte gewachsen auf (001)-Substraten:

- Die Zustandsdichten und elektronischen Niveaus sind durch Delta-Funktionen zu beschreiben.
- Jeder Zustand ist zweifach entartet, ist also nur mit zwei Ladungsträgern zu besetzen (Spinentartung).
- Es gibt keine Zustände „freier“ Ladungsträger mit einer impulsabhängigen Dispersion der Energie, wie in einbis dreidimensionalen Strukturen.
- Bei Besetzung mit mehr als einem Ladungsträger sind diese über die Coulomb-Wechselwirkung korreliert, die von der Größe des Quantenpunkts abhängt. Diese Abhängigkeit kann daher zu positiver oder negativer Bindungsenergie des Biexzitons, positiver oder negativer Austauschspaltung führen. Diesen Effekt gibt es in der Atomphysik nicht.

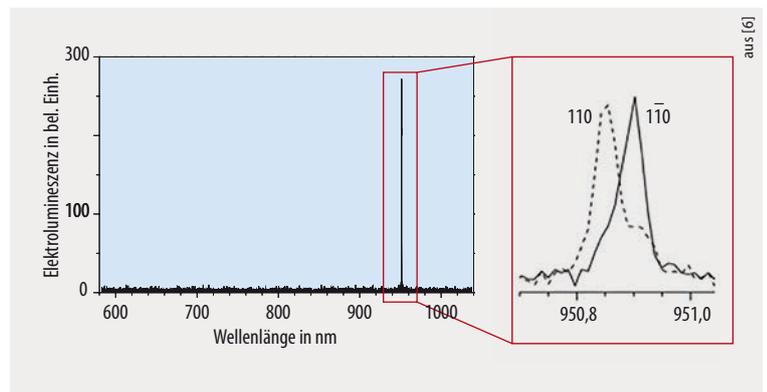


Abb. 4 Das Lumineszenz-Spektrum eines Exzitons in einem einzelnen (InGa)As/GaAs-Quantenpunkt zeigt nur einen scharfen Peak (links), der im rechten Teil samt Polarisation vergrößert dargestellt ist.

- Mit Elektronen und Löchern besetzte Quantenpunkte besitzen ein eingebautes Dipolmoment, da die Schwerpunkte der Elektronen- und Lochwellenfunktionen nicht identisch sind.
- Analog zur Berechnung der Wellenfunktionen in Übergittern sind diese auch für vertikal gekoppelte Quantenpunkte möglich. Das für viele Bauelemente wichtige Verhältnis zwischen transversal elektrischer (TE) zu transversal magnetischer (TM) Polarisation ist als Funktion des Abstands der aktiven Schichten einstellbar.

Coulomb-Wechselwirkung, anisotrope Austauschwechselwirkung und Korrelation beeinflussen stark und abhängig von Form, Größe und Materialverteilung die Vielteilchenzustände, also beispielsweise Exzitonen und Biexzitonen. Die Austauschwechselwirkung hebt die vierfache Entartung des exzitonischen Grundzustands auf und führt zu einer Aufspaltung in je zwei optisch aktive und inaktive Zustände. Die oben erwähnte Erniedrigung der Symmetrie des Quantenpunkts sorgt nun dafür, dass sich der exzitonische Grundzustand weiter aufspaltet (**Abb. 3**). Bemerkenswerterweise werden automatisch polarisierte Photonen emittiert, und die Polarisation wird nach der Rekombination des ersten Elektron-Loch-Paares eines exzitonischen Moleküls auf die Rekombination des Exzitons

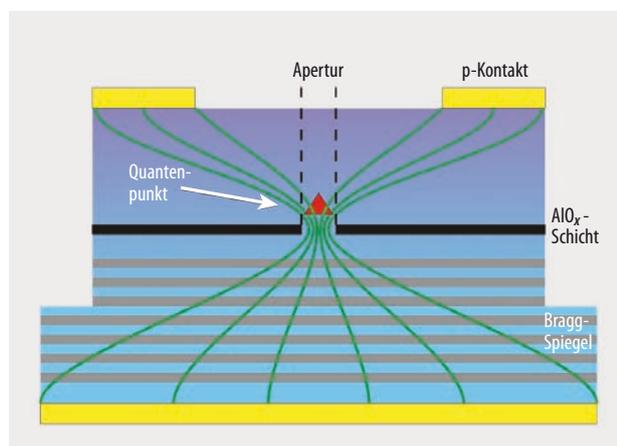


Abb. 5 Der Querschnitt eines elektrisch getriebenen Qubit-Emitters mit einem Bragg-Spiegel zeigt die Lage des Quantenpunkts oberhalb der Oxidapertur sowie den Stromfluss.

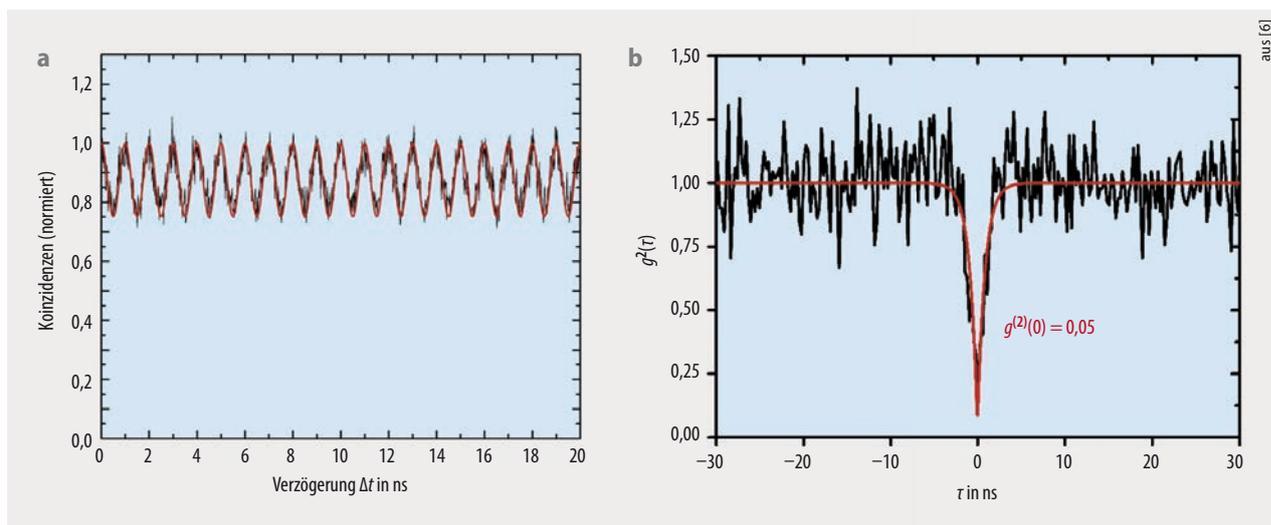


Abb. 6 Optische Antwort eines Einzelphotonenemitters auf ein elektrisches 1-GHz-Signal mit Pulsbreiten von 350 ps zusammen mit einer Simulation einer Antwort unter der Annahme von 400-ps-Pulsen (a). Hanbury-Brown-Twiss-Korrelationsmessungen zeigen ein klares Antibunching (b). Die rote Kurve stellt die Simulation eines perfekten Einzelphotonenemitters unter Berücksichtigung der limitierten Zeitauflösung des Aufbaus von 0,7 ps dar.

vererbt [4]. Damit stellt die Rekombination eines Exzitons oder Moleküls in einem einzelnen Quantenpunkt eine natürliche Quelle von Quantenbits (Qubits) dar. Diese Polarisation der Emission eines einzelnen Quantenpunkts haben wir mittels Kathodo- oder Mikrophotolumineszenz-Spektroskopie [5] von einzelnen Quantenpunkten in Kombination mit Schattenmasken demonstriert [5, 6] (**Abb. 4**). Bei der Kathodolumineszenz übernimmt ein stark fokussierter Elektronenstrahl bei geringen Beschleunigungsspannungen in einem modifizierten Rasterelektronenmikroskop die Rolle der Anregung.

Einzelne Quantenpunkte als Emmitter

Die Kombination grundlegender Prinzipien der Quantenmechanik mit moderner Informationstheorie erlaubt

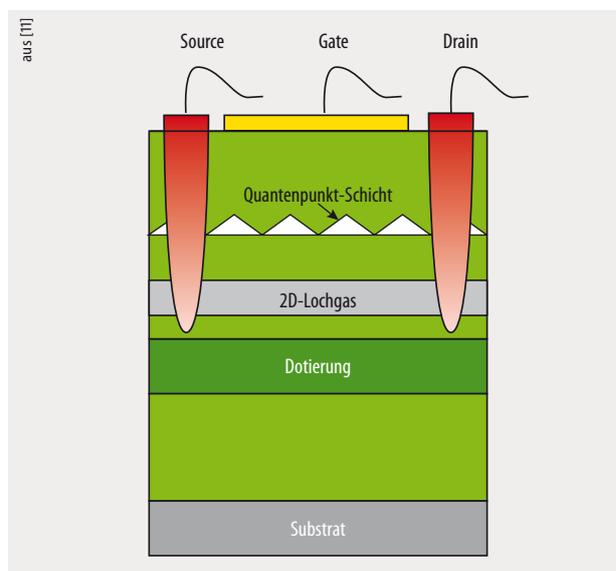


Abb. 7 Ein solcher Quantenpunkt-Flash-Speicher wurde bereits in verschiedenen III-V-Materialsystemen realisiert.

es, inhärent sichere Verschlüsselungssysteme für die Datenübertragung zu entwickeln. Einer der ersten und bekanntesten Vorschläge dafür ist das BB84-Protokoll von Bennet und Brassard [7]. Die „Quantum Information Science and Technology Road Map“ oder die im März 2020 von der IEEE verabschiedete „International Roadmap for Devices and Systems“ verlangen die Entwicklung kostengünstiger praktischer Quellen einzelner Qubits und verschränkter Photonen, um BB84 und spätere Protokolle zu realisieren.

Bettet man einen einzelnen Quantenpunkt in eine p-i-n-Struktur ähnlich eines modifizierten oberflächenemittierenden Lasers ein, so resultiert eine Quelle von „Qubits on demand“ mit Raten im Gbit/s-Bereich.

Kontrolliertes Wachstum mittels MBE oder MOCVD von (InGa)/GaAs-Quantenpunkten sehr geringer Dichten von etwa 10^8 cm^{-2} haben wir sowohl unter als auch über Oxidaperturen realisiert [6, 8]. Dabei gelang es, derartige Quantenpunktschichten in p-i-n-Strukturen mit Distributed-Bragg-Reflektor-Spiegeln einzubetten und damit elektrisch gepumpte resonante Mikrokavitäten herzustellen (**Abb. 5**). Infolge des Purcell-Effekts erhöht sich bei diesen die Rate der Emission. Diese ist zudem gerichtet und besitzt eine hohe Quantenausbeute. Derartige Bauelemente haben wir mittels eines elektrischen Pulsgenerators bei einer Pulsdauer von 350 ps und einer Wiederholrate von 1 GHz betrieben (**Abb. 6**) [8]. Der Wert der Autokorrelationsfunktion $g^{(2)}(0) = 0,05$ bewies, dass ein Emmitter von einzelnen Qubits vorliegt.

Quantenkommunikation über größere Distanzen erfordert „Quantenrepeater“, die auf verschränkten Photonen basieren können. Ein vielversprechender Vorschlag zu ihrer Realisierung beruht auf der Biexziton-Exziton-Rekombinationskaskade. Hierfür sollte die Feinstrukturaufspaltung Null sein. Das ist möglich, da dieser Wert über die Größe des Quantenpunkts einstellbar ist [1, 6]. Externe Felder können hierzu ebenso beitragen. Eine mög-

Viele Quantenpunkte für photonische Bauelemente

Bereits unsere ersten Untersuchungen belegten, dass der Materialgewinn von Stranski-Krastanov-Quantenpunktschichten tatsächlich um Größenordnungen über jenem eines identischen dreidimensionalen Materials liegt und sogar größer ist als theoretisch vorhergesagt [1]. Quantenpunktschichten lassen sich einfach stapeln, sodass auch der modale Gewinn in Quantenpunktlasern so groß oder größer ist als in vergleichbaren Quantengrabenlasern. Eine frühe Beobachtung von uns war jene effizienter Laseremission bei Wellenlängen von $1,3\ \mu\text{m}$ und in metamorphen Strukturen, also Strukturen mit geringen Defektdichten, mit Emission jenseits von $1,5\ \mu\text{m}$, mittels GaAs-basierter Bauelemente. Die spontane Lebensdauer eines Exzitons in einem Quantenpunkt ist dort aufgrund seiner starken Lokalisation kürzer als in einem Quantengraben. Daher kann die Quantenausbeute auch in einer Struktur mit Defekten gut sein. Eingang in viele heutige Produkte finden Quantenpunkte in nitridbasierten LEDs und Laserdioden, die sogar hohe Defektdichten haben [12].

Wellenlängen im IR-Bereich lassen sich mit GaAs-basierten Quantenpunktlasern erreichen, da die Emission der Quantenpunkte über ihre Größe und die Komposition der Barriere durchstimmbare ist [1, 6]. Eine effiziente Emission bei $1,3\ \mu\text{m}$ war zuvor nur mittels InP-basierter Quantengrabenlaser möglich. In den direkt darunter liegenden Wellenlängenbereichen gab es keine Diodenlaser. Im Vergleich zu Quantengrabenlaser haben Quantenpunkt laser wesentlich geringere Schwellstromdichten. Zudem ist ihr Schwellstrom bis etwa $70\ ^\circ\text{C}$ in den von uns entwickelten Strukturen nahezu nicht von der Temperatur abhängig. Damit sind diese in vielen Fällen im Modul ohne kosten- und energieaufwändige Peltier-Kühlung zu betreiben. Der Energieverbrauch von Quantenpunkt-Lasermodulen ist somit viel geringer.¹⁾ Im Folgenden soll eine wesentliche Anwendung GaAs-basierter Quantenpunkt laser im Fokus stehen, die dazu dient, Frequenzkämme zu erzeugen und für effiziente Datenübertragung im Terabit/s-Bereich zu nutzen.

Datenübertragung mittels Quantenpunkt laser

Aufgrund der Selbstähnlichkeit besitzen Quantenpunkte identische Symmetrieeigenschaften, ohne aber selbst identisch zu sein. Die Emission eines $1\ \text{mm}$ langen und $100\ \mu\text{m}$ breiten Kantenemitters mit 10^{11} Quantenpunkten pro Quadratzentimeter in der aktiven Zone basiert auf der Emission von hundert Millionen unterschiedlichen Quantenpunkten, von denen jeder auf einer minimal anderen Wellenlänge emittiert. Die Überlagerung dieser Emissionen führt zu einer Gauß-förmigen Einhüllenden mit einer Halbwertsbreite von 30 bis $100\ \text{meV}$, die in Grenzen durch Änderung der Wachstumsbedingungen zu kontrollieren ist.

Die spektrale Halbwertsbreite und die Breite eines emittierten Pulses auf der Zeitskala sind mittels einer

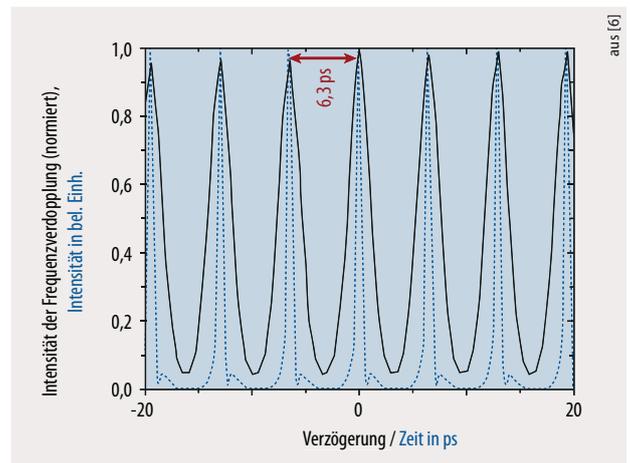


Abb. 9 Dieser Pulskamm eines modengekoppelten Quantenpunkt lasers mit Chirp-Kompensation bei $160\ \text{GHz}$ wurde aus einem 80-GHz -Kamm mittels Zeitmultiplexen erzeugt. Die schwarze Kurve zeigt die Autokorrelationsmessung. Der entfaltete Kamm ist blau gepunktet.

Fourier-Transformation miteinander korreliert. Je größer die spektrale Halbwertsbreite, desto geringer ist die Pulsbreite. Die Kopplung der Phasen der longitudinalen Moden eines Lasers erlaubt somit Pulse, deren Dauer und Wiederholrate weit jenseits der intrinsischen Bandbreite eines direkt modulierten Lasers liegen. Die Möglichkeit, Pulse einer Breite von einigen hundert Femtosekunden mittels passiver Modenkopplung im Telekom-O- oder -C-Band zu erzeugen, resultiert aus der Gauß-Verbreiterung. Mithilfe der Überlagerung der Emission lassen sich zudem viele ultraschnelle Pulse unterschiedlicher Wellenlänge in Halbleiter-Verstärkern (Wellenlängen-Multiplexen) ohne Übersprechen gleichzeitig verstärken.

Modengekoppelte Halbleiterlaser, die optische (als auch elektrische) Pulsfolgen emittieren, entwickeln sich zurzeit zum Rückgrat optischer Nachrichtentechnik mit hoher Bitrate. Sie kommen als optische Uhren zum Einsatz, zur Erzeugung von Frequenzkämmen und in Kombination mit Modulatoren als Transmitter für optische Zeitmultiplexsysteme. Bei letzteren werden Frequenzkämme einander phasenverschoben überlagert. Passive modengekoppelte Halbleiterlaser sind kostengünstig herstellbar, da sie neben dem Laser mit dem sättigbaren Absorber nur ein zusätzliches Element im Resonator besitzen. Beide benötigen eine Gleichstromversorgung von wenigen Volt. Der Absorber ermöglicht einen Selbststart der Pulsemission ohne externe Radiofrequenzquelle.

Wir haben gezeigt, dass sich derartige Quantenpunkt-basierte modengekoppelte Halbleiterlaser, die bei $1,3\ \mu\text{m}$ emittieren, innerhalb von Pikosekunden bei ausreichender Sperrspannung erholen. Solche Laser erlauben es mit einer 160-GHz -Pulsfolge, Datenraten von $160\ \text{Gb/s}$ zu übertragen (**Abb. 9**) [6]. Bei modengekoppelten Halbleiterlasern variiert die Eintreffzeit aufeinander folgender Pulse (zeitlicher Jitter) aufgrund spontaner Fluktuationen der Photondichte, was zu verstärkter spontaner Emission führt. Dieser Jitter begrenzt die nutzbare Frequenz bzw. Bandbreite. Im Vergleich zu Quantengrabenlasern ist der Jitter bei mo-

¹⁾ Viele weitere Details zu den fundamentalen Vorteilen von Lasern und Verstärkern, die auf Quantenpunkten beruhen, finden sich in [1, 6] sowie in [13] mit dem Schwerpunkt energieeffizienter Datenübertragung.

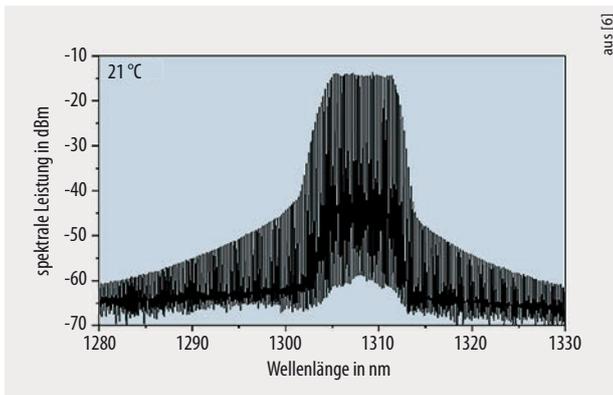


Abb. 10 Die longitudinalen Moden eines InAs/GaAs-Quantenpunkt-Lasers sind hutartig verteilt, wenn der Grundzustand der Quantenpunkte bei hohen Strömen in die Sättigung geht. Bei geringeren Strömen resultiert eine Gauß-artige Modenverteilung.

dengekoppelten Quantenpunkt-Lasern jedoch wesentlich geringer.

Unabhängig von der Emission entwickelt sich im Spektrum eines modengekoppelten Quantenpunkt-Lasers mit zunehmendem Strom ein immer breiteres hutartiges Ensemble von Longitudinalmoden, die sich in ihrer Spitzenleistung um weniger als 3 dB unterscheiden. Der Grund hierfür liegt darin, dass Quantenpunkte nur maximal zwei Ladungsträger pro Niveau speichern können und daher bei Injektion von Ladungsträgern schnell sättigen (**Abb. 10**).

Separiert man die 40 einzelnen Moden mittels schmalbandiger Filter und moduliert diese mit schnellen Modulatoren, ermöglichen Quantenpunkt-basierte Bauelemente Übertragungsraten von etwa 6,4 Terabit/s. Mehrere Arbeitsgruppen weltweit arbeiten derzeit an deren Demonstration und dem Einsatz in Netzen jeglicher Reichweite. Der Bedarf nach höheren Datenraten steigt durch die Nutzung neuer Dienste wie Netflix oder Bitcoin exponentiell an. Mittels Quantenpunkt-Laser lassen sich somit vorhandene Netzinfrastrukturen besser nutzen. Dies verringert gleichzeitig die Kosten sowie den Energieaufwand für die Lichtquellen.

Zusammenfassung

Die elektronischen und optischen Eigenschaften von Halbleiter-Quantenpunkten lassen sich quantitativ modellieren, wie hier beschrieben wurde. Die Modellierung beruht auf der detaillierten strukturellen Charakterisierung mit atomarer Auflösung. Die im Vergleich zu klassischen Festkörperstrukturen „seltsamen“ Eigenschaften sind durch die Quantennatur bestimmt und experimentell verifiziert. Beispielhaft wurden neuartige Quantenbauelemente vorgestellt, die auf einem, wenigen oder Millionen von Quantenpunkten beruhen. Die Herstellung solcher Bauelemente mittels epitaktischer Quantentechnologien gelingt für Modellsysteme. Deren riesiges Anwendungspotenzial ist jedoch bei weitem nicht ausgeschöpft und inspiriert weiterhin die weltweite Forschung.

Danksagung

Einer großen Zahl engagierter Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die immer wieder mit eigenen Ideen zum Fortschritt dieser neuen Forschungsrichtung beitrugen und über für unsere Gesellschaft nützliche Anwendungen nachdachten, sei herzlich gedankt. Ohne ihr Engagement wären die hier vorgestellten Ergebnisse nicht zustande gekommen. Durch ihre finanzielle Unterstützung haben die DFG über mehrere SFBs, das BMBF unter anderem mittels des VIP-Programms, die EU mittels EFRE, der Berliner Senat, die Leitung der TU Berlin, die Aixtron AG und in der Anfangsphase die Volkswagenstiftung mit der Finanzierung der Kooperation mit Russland die notwendigen Voraussetzungen geschaffen. Dafür bin ich dankbar.

Literatur

- [1] D. Bimberg, M. Grundmann und N. N. Ledentsov, *Quantum Dot Heterostructures*, Wiley, Chichester (1998) und D. Bimberg, *Physik Journal*, August/September 2006, S. 43
- [2] V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov und D. Bimberg, *Epitaxy of Nanostructures*, Springer (2004)
- [3] M. Grundmann, O. Stier und D. Bimberg, *Phys. Rev. B* **52**, 11969 (1995); A. Schliwa und M. Winkelkemper, in: D. Bimberg (Hrsg.), *Semiconductor Nanostructures*, Springer (2008), S. 139
- [4] S. Rodt et al., *Phys. Rev. B* **68**, 035331 (2003)
- [5] J. Christen, M. Grundmann und D. Bimberg, *J. Vac. Sci. & Techn. B* **9**, 2358 (1991)
- [6] D. Bimberg, *Nanophotonics* **7**, 1245 (2018)
- [7] C. M. Bennett und G. Brassard, *Proc. IEEE Conf on Computers, Systems, and Signal Processing*, Bangalore, Indien (1984), S. 175
- [8] A. Strittmatter et al., *Appl. Phys. Lett.* **100**, 093111 (2012)
- [9] A. Schliwa, G. Hönig und D. Bimberg, in: M. Ehrhardt und Th. Koprucki (Hrsg.), *Multi-Band Effective Mass Approximations*, Springer (2014), S. 57
- [10] M. Inman, *New Scientist*, Daily News, March 7, 2008, bit.ly/308DScV
- [11] D. Bimberg und L. Bonato, *Proc. 24th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology*, St. Petersburg Academic University (2016), S. 1
- [12] J. J. Wierer jr. et al., *Laser Review* **41**, 899 (2014)
- [13] D. Arsenijevic und H. Schmeckebier et al., in: G. Eisenstein und D. Bimberg (Hrsg.), *Green Photonic and Electronics*, Springer (2017)

Der Autor



Dieter Bimberg studierte Mathematik, Philosophie und Physik in Tübingen und Frankfurt am Main, wo er in Physik promovierte. Für die Max-Planck-Gesellschaft baute er ab 1972 das Hochfeld-Magnetlabor in Grenoble auf, wo er eine Arbeitsgruppe für optische Spektroskopie leitete.

1979 nahm er einen Ruf an die RWTH Aachen an. 1981 folgte er der Bitte der TU Berlin, den Studiengang Angewandte Physik aufzubauen, wo er 21 Jahre geschäftsführender Direktor des Instituts für Festkörperphysik und Gründer des Zentrums für Nanophotonik war. Gastaufenthalte führten ihn an das Technion in Haifa, das Royal Signals and Radar Establishment in Malvern (UK), die HP Labs in Palo Alto, die University of California in Santa Barbara und die King Abdulaziz University in Jeddah (Saudi-Arabien). Seit 2018 leitet er ein neues Zentrum für „Grüne Photonik“ der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Changchun. Er ist Mitglied bzw. Foreign Fellow der Deutschen, Russischen und Amerikanischen Akademien der Wissenschaften.

Prof. Dr. Dieter Bimberg, Center of NanoPhotonics, Institut fuer Festkörperphysik, TU Berlin, Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin und CIOMP der CAS