

FORSCHUNGSBEITRAG ZUR PHYSIK



Bereits während des Ingenieur- und des Physikstudiums sowie der Physik-Promotion konnte Stefan Breuer die faszinierenden Eigenschaften von Halbleiterlasern studieren und das Verständnis ihrer besonderen Emissionsdynamik vertiefen. Aktuell arbeitet er interdisziplinär innerhalb dreier Forschungsschwerpunkte, die alle auf den besonderen Eigenschaften quantenpunktbasierter Lichtquellen aufbauen – angefangen bei der Exploration der gekoppelten Zweizustandsemission, welche einen neuen Freiheitsgrad in der Interferometrie eröffnet und gewinnbringend in der Velozimetrie genutzt werden kann. Im von Breuer untersuchten Gebiet der Bildgebung in der Mikrofluidik verspricht diese Zweizustandsemission weitere Vorteile: So werden Methoden zur Stabilisierung ultrakurzer optischer Pulse aus Quantenpunktlasern entwickelt und untersucht. Die Optimierung der Pulsleistung für die Bildgebung in der nichtlinearen Mikroskopie stellt dabei einen anwendungsorientierten Schwerpunkt dar. Breuers Forschung und Lehrtätigkeit wurde 2010 mit dem Gerhard-Herzberg-Forschungspreis und 2013 mit dem Adolf-Messer-Preis und dem Athene-Preis für Gute Lehre ausgezeichnet.

DR. STEFAN BREUER

MASSGESCHNEIDERTE QUANTENPUNKT-HALBLEITERLASER – INNOVATIV, SCHNELL UND VIELSEITIG

Seit seiner Erfindung vor 53 Jahren ist dem Halbleiterlaser als optoelektronisches Schlüsselbauelement eine beispiellose Erfolgsgeschichte gelungen. Quantenpunktlaser bilden die jüngste der Halbleiterlasergenerationen. Diese innovativen nanostrukturierten Laser sind insgesamt nur wenige Millimeter lang und bestehen aus Halbleiterschichten zwischen denen nur wenige Nanometer große Halbleiter-Quantenpunkte eingebettet sind (Abbildung 1). Dabei weisen diese Quantenpunkte einzigartige elektronische und optische Eigenschaften auf [1]. Aufgrund ihrer geringen Größe erlauben sie sehr scharfe und diskrete vollständig quantisierte Energieniveaus, vergleichbar mit denen eines einzelnen Atoms, weshalb Quantenpunkte auch als „künstliche Atome“ bezeichnet werden. Darüber hinaus können während des Wachstums dieser Quantenpunkte die benötigten Photonenenergien und damit die Laserwellenlängen anhand der Kontrolle von Größe, Form, Zusammensetzung und Umgebung der Quantenpunkte gezielt maßgeschneidert werden. Damit können technologisch nicht nur einige gezielte Wellenlängen eingestellt werden, sondern es kann auch eine spektral sehr breitbandige Lichterzeugung erzielt werden.

Weitere spezielle und vorteilhafte Eigenschaften von Quantenpunktlasern sind niedrige Schwellströme, eine sehr schnelle Ladungsträgerdynamik und eine geringe Sensitivität gegenüber der Umgebungstemperatur.

Bereits aus dieser Auswahl spezieller Quantenpunktlasermerkmale ergeben sich faszinierende Konsequenzen in der anwendungsorientierten Grundlagenforschung, die völlig neue und direkte Anwendungspotenziale in der hochauflösenden nichtlinearen Mikroskopie, die ein essenzielles Werkzeug der Biologie und Medizin ist, eröffnen. Zum Beispiel werden bisher gepulste Festkörperlaser zur Anregung von Markern in biologischen Proben angewendet, deren Fluoreszenzsignal Aufschluss über spezifische Zellmerkmale erlaubt.

Insbesondere wird durch Einsatz gepulsten Laserlichts eine sehr hohe Ortsauflösung erzielt. Quantenpunktlaser ermöglichen die

Kurzzusammenfassung:

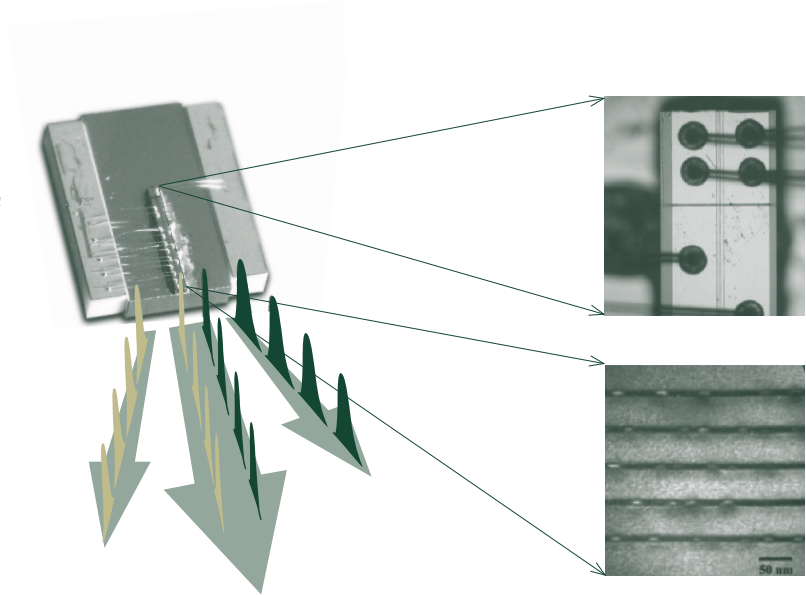
Maßgeschneiderte Halbleiterlaser basierend auf Nanometer großen Quantenpunkten besitzen einzigartige elektronische und optische Eigenschaften und stehen im Fokus aktueller Grundlagenforschung: Die ultraschnelle Ladungsträgerdynamik erlaubt die Entwicklung hochkompakter Quantenpunktlaser zur Sub-Pikosekunden-Pulserzeugung z. B. für Anwendungen in der nichtlinearen Mikroskopie. Weiterhin ermöglicht die gezielte Umkehr der klassischen energetischen Abfolge der Lichtemission die Realisierung kontaktloser Laser-Velozimetrie-Konzepte zur optimierten Detektion diffus-reflektierender Objekte z. B. in der Mikrofluidik. Die Erforschung und Entwicklung dieser innovativen Quantenpunkt-Emitter erfolgt interdisziplinär in enger Abstimmung mit Halbleitertechnologie- und Theoriegruppen um die Laser in Schlüsselanwendungen zum Einsatz zu bringen und die zugrunde liegende Physik noch besser zu verstehen.

Abbildung 1:

Quantenpunkt-Halbleiterlaser mit maßgeschneiderten Emissionseigenschaften: Wenige Nanometer große Halbleiter-Quantenpunkte, eingebettet in einer Mehrschichtstruktur in der aktiven Zone des Lasers (links). Foto eines wenige Millimeter langen Quantenpunktlasers, der flexibel Pulse zweier Wellenlängen, illustriert durch dunkel- und hellgrün, erzeugt, die verblüffend einfach auswählbar sind (links). Zoom auf die lange Laser- und die kurze Absorbersektion (rechts) [6, 7].

Quelle links und rechts oben: S. Breuer.

Quelle rechts unten: M. Hopkinson, Universität Sheffield, Großbritannien.



Erzeugung von Wellenlängen im für diese Anwendung vorteilhaften nahinfraroten Spektralbereich. Sie können so eine hohe Eindringtiefe des Lichts in biologisches Gewebe, basierend auf der idealen Kombination von geringer Absorption des nahinfraroten Lichtes durch Wasser als auch geringer Streuverluste durch Biomaterie, gewährleisten. Basierend auf quantenpunktspezifischer ultraschneller Ladungsträgerdynamik eignen sie sich besonders zur Pulserzeugung mit Pulsbreiten im Sub-Pikosekunden- bzw. niedrigen Pikosekundenbereich in Kombination mit hoher Pulsspitzenleistung und zugleich hoher mittlerer optischer Ausgangsleistung [2, 3].

Technologisch wird dazu ein kleiner Teil des lichtführenden Bereichs des Lasers mit einem separaten elektrischen Kontakt versehen der eine so genannte Absorbersektion definiert (Abbildung 1, rechts oben). Durch Anlegen einer geeigneten Konstantspannung kann sättigbare Absorption – ein intensitäts- und zeitabhängiger, sehr schneller Prozess – stimuliert werden, welcher im Laser das Erzeugen kurzer Pulse ermöglicht. Diese Pulserzeugung erfolgt dabei bei hohen Pulsfrequenzen von einigen Milliarden Pulsen pro Sekunde.

Notwendige Voraussetzung für diesen Prozess ist, dass sich die pulserzeugende Ab-

sorption innerhalb der Umlaufzeit eines Pulses im Quantenpunktlaser erholt und so die Ladungsträger für weitere Pulserzeugung zur Verfügung stehen. Dies wird aufgrund der spezifischen Ladungsträgerdynamik auf ultrakurzen Zeitskalen gewährleistet. Um ultrakurze Pulse zu erzeugen, spielt die spektrale Breite des Lasers eine zentrale Rolle. Je breiter das optische Spektrum, desto kürzer sind in der Regel die Pulse. Mittels der quantenpunkteigenen Wachstumsbedingungen kann die spektrale Breite der Laser z. B. durch Variation der Größen der Punkte unmittelbar vergrößert werden.

Ein gezieltes Dimensionieren der Wellenleitergeometrie sichert dabei die Erzeugung hoher optischer Ausgangsleistungen. Ein solches kann auch in der Realisierung optoelektronischer Verstärker-Bauelemente, die das rein-optische Verstärken gepulsten Laserlichts ermöglichen, gewinnbringend angewendet werden. Dort wird die Laserlichterzeugung gezielt unterbunden und der physikalische Prozess der stimulierten Emission zur rein-optischen Verstärkung ausgenutzt. Dieser erlaubt es, das von einem Quantenpunktlaser extern eingestrahlte gepulste Licht zu verstärken.

Hier spielen nun wiederum die Quantenpunkte eine zentrale Rolle, um die laserphysikalischen Eigenschaften solcher Verstärker maßgeblich zu verbessern: sie ermöglichen sehr hohe Verstärkungen, eine sehr hohe

spektrale Bandbreite und insbesondere eine hohe Sättigungsleistung [4].

Mittels eines so maßgeschneiderten ultrakompakten Halbleiterlaser-Systems bestehend aus einem optimierten gepulsten Quantenpunktlaser mit nachgeschaltetem Quantenpunktverstärker ist es meinem Team im Rahmen eines Kooperationsprojekts kürzlich erstmals gelungen, bisher unerreichte Pulsspitzenleistungen im relevanten Wellenlängenbereich zu erzeugen. Damit bieten die entwickelten Quantenpunktlaser und Quantenpunktverstärker unmittelbar das Potenzial in der nichtlinearen Mikroskopie experimentell angewendet zu werden.

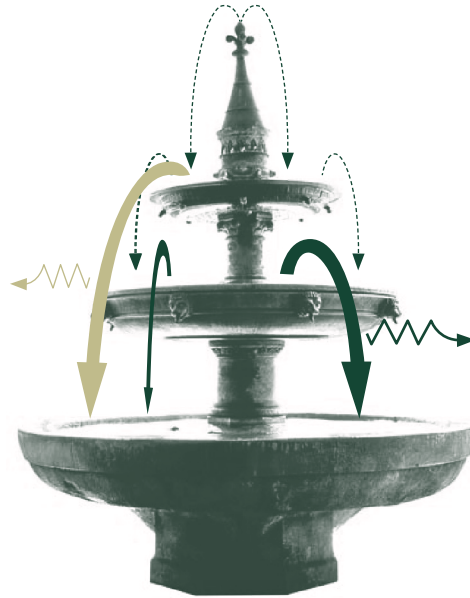
Gepulste und kontinuierlich-emittierende Quantenpunkt-Halbleiterlaser eröffnen darüber hinaus eine Vielfalt spannender Möglichkeiten zur Grundlagenforschung, die in verschiedenen Schwerpunkten von mir und anderen internationalen Arbeitsgruppen erforscht werden [5].

Basierend auf der nulldimensionalen Zustandsdichte und eines neu entwickelten Laserkonzepts konnte ich z. B. die klassische spektrale Abfolge der Lichtemission, die Hierarchie der Emissionszustände eines Zwei-

” Die Erforschung der neuartigen Emissionsdynamik aktuellster Halbleiterlaser basierend auf nanoskaligen Quantenpunkten im Rahmen interdisziplinärer Grundlagenforschung hat das Ziel Anwendungsperspektiven in Schlüsselanwendungen zu eröffnen sowie die zugrundeliegende Physik dieser besonderen Strukturen noch besser zu verstehen. “

Dr. Stefan Breuer

Abbildung 2: Wasserbrunnen, der die konventionelle (rechte Hälfte) und die „umgekehrte“ Emissionsreihenfolge (linke Hälfte) anhand eines vereinfachten Energieschemas eines Quantenpunktlasers und das schematische Erzeugungsprinzip zweier Wellenlängen symbolisiert. Jede Schale repräsentiert ein Energieniveau. Zunächst wird eine Schale nach der anderen befüllt. Bei der umgekehrten Emissionshierarchie fließt zusätzlich Wasser von der obersten direkt in die unterste Schale, sodass zuerst höher-energetisches Licht erzeugt werden kann [6, 7]. Quelle: adaptiert nach LMZ Baden-Württemberg.



zustands-Quantenpunktlasers gezielt von zuerst langwelliger Strahlung zu kurzwelliger Strahlung umkehren (Abbildung 2) [6]. Unter Verwendung eines bestehend einfachen Konzepts, eines variablen Ohmschen Widerstands an der Absorbersektion, ist darüber hinaus ein flexibles Hin- und Herschalten der gepulsten Lichtemission der beiden Wellenlängen möglich [7]. In der Laserphysik ist dieser Vorgang der „auf den Kopf gestellten“ Emissionshierarchie und die daraus resultie-

rende maßgeschneiderte Laseremission einzigartig. Zwar wurde in der Vergangenheit bereits die Erzeugung zweier Wellenlängen in einem Quantenpunktlaser gezeigt [8]; allerdings erfolgte diese gepulste Emission nicht synchronisiert, – da „ungekoppelt“, und war damit nur eingeschränkt nutzbar. Diese Limitierung konnte ich durch geeignete Wahl der spektral breitbandigen internen Quantenpunktstruktur in Kombination mit einer Absorbersektion aufheben [9]. So können beide Emissionszustände im Halbleiterlaser mittels einer komplexen internen wechselseitigen Dynamik koppeln.

Erst diese Voraussetzung ermöglicht es, diese Zweizustands-Laseremission auf besondere Weise zu nutzen: Innerhalb eines selbst-interferometrischen Experiments ist es mir kürzlich gelungen, die besonderen Emissionseigenschaften eines solchen Zweizustands-Quantenpunktlasers erstmals gewinnbringend für die Velozimetrie gezielt nutzbar zu machen.

Die technologisch realisierte und flexibel schaltbare Emission auf zwei Wellenlängen in einem Laser, basierend auf der Kopplung der Ladungsträgerdynamik der Quantenpunkt-Niveaus, erlaubt dabei die Erzeugung eines breitbandig-einstellbaren virtuellen Wellenlängenspektrums, welches ein hohes Potenzial in der Velozimetrie aufweist. Diese Vorgehensweise wurde an schnell-bewegten diffus-reflektierenden Objekten mit Hilfe

eines sehr kompakten Quantenpunkt-Halbleiterlasers demonstriert [10].

Die hier skizzierte anwendungsorientierte Grundlagenforschung spiegelt einen Teil der bisher von mir verfolgten Arbeiten wider und hat zur Auszeichnung als Jungwissenschaftler beigetragen.

ist dabei maßgeblich, um die innovativen und vielversprechenden optoelektronischen Bauelemente auf Basis von Halbleiter-Quantenpunkten weiterzuentwickeln, diese in Schlüsselanwendungen zum Einsatz zu bringen und die zugrunde liegende Physik noch besser zu verstehen.

” Die Entwicklung und Modellierung innovativer Zweizustands-Quantenpunktlaser erlaubt die experimentelle Realisierung eines neuen, kontaktlosen und kompakten Doppler-Velozimetrie-Konzepts zur optimierten Geschwindigkeitsdetektion diffus-reflektierender Objekte. “

Dr. Stefan Breuer

Die Ausrichtung der Forschung zielt neben der Erarbeitung eines verbesserten physikalischen Verständnisses der quantenpunkt-intrinsischen Eigenschaften und den daraus resultierenden neuen Funktionalitäten auch auf die Exploration möglicher neuer Anwendungsperspektiven; einerseits experimentell und andererseits mittels numerischer Modellierungen.

Dabei ist fachübergreifende Zusammenarbeit essenziell, insbesondere in europäischen Kooperationen. Die enge Abstimmung mit Halbleitertechnologiegruppen

Literaturverzeichnis

- [1] E. U. Rafailov, M. A. Cataluna, and W. Sibbett. Mode-locked quantum-dot lasers. *Nat. Photonics*, 1(7):395–401, July 2007.
- [2] T. Xu, P. Bardella, and I. Montrosset. Quantum dot passively mode-locked laser optimization for high-power and short pulses. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 25(1):63–66, Jan 2013.
- [3] D. I. Nikitichev, Y. Ding, M. A. Cataluna, E. U. Rafailov, L. Drzewietzki, S. Breuer, W. Elsaesser, M. Rossetti, P. Bardella, T. Xu, I. Montrosset, I. Krestnikov, D. Livshits, M. Ruiz, M. Tran, Y. Robert, and M. Krakowski. High peak power and sub-picosecond Fourier-limited pulse generation from passively mode-locked monolithic two-section gain-guided tapered InGaAs quantum-dot lasers. *Laser Phys.*, 22:715–724, April 2012.
- [4] T. Xu, P. Bardella, M. Rossetti, and I. Montrosset. Beam propagation method simulation and analysis of quantum dot flared semiconductor optical amplifiers in continuous wave high-saturation regime. *IET Optoelectron*, 6(2):110–116, April 2012.
- [5] S. Breuer, D. Syvridis, and E. U. Rafailov. Chapter: Ultra-short pulsed edge-emitting lasers. Book title: *The Physics and Engineering of Compact Quantum Dot-based Lasers for Biophotonics*. Wiley-VCH Verlag, 2014.
- [6] S. Breuer, M. Rossetti, W. Elsässer, L. Drzewietzki, P. Bardella, I. Montrosset, M. Krakowski, and M. Hopkinson. Reverse-emission-state-transition mode locking of a two-section InAs/InGaAs quantum dot laser. *Appl. Phys. Lett.*, 97(7):071118, August 2010.
- [7] S. Breuer, W. Elsaesser, and M. Hopkinson. State-switched modelocking of two-segment quantum dot laser via self-electro-optical quantum dot absorber. *Electron. Lett.*, 46(2):161, January 2010.

[8] M. A. Cataluna, W. Sibbett, D. A. Livshits, J. Weimert, A. R. Kovsh, and E. U. Rafailov. Stable mode locking via ground- or excited-state transitions in a two-section quantum-dot laser. *Appl. Phys. Lett.*, 89(8):081124, August 2006.

[9] S. Breuer, M. Rossetti, L. Drzewietzki, P. Bardella, I. Montrosset, and W. Elsässer. Joint experimental and theoretical investigations of two-state mode locking in a strongly chirped reverse-biased monolithic quantum dot laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 47(10):1320–1329, October 2011.

[10] M. Gioannini, M. Dommermuth, L. Drzewietzki, I. Krestnikov, D. Livshits, M. Krakowski und S. Breuer „Two-state-laser velocimetry exploiting coupled quantum-dot emission-states: Experiment and numerical simulation“, *Opt. Express* 22(19): 23402, September 2014.