Zusammenfassung

Quantenpunkte sind quasi-nulldimensionale Halbleiterstrukturen, die Anwendung als Gewinnmedium in neuartigen Halbleiterlasern finden. In der vorliegenden Arbeit werden die Relaxationsdynamik von Ladungsträgern in Quantenpunkten sowie die Emissionsdynamik von Quantenpunktlasern experimentell untersucht. Dies geschieht durch Ultrakurzzeitspektroskopie mit hoher Zeitauflösung.

Eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz von selbstorganisierten Quantenpunkten in einem Halbleiterlaser ist eine hinreichend schnelle Relaxation von Ladungsträgern von höherdimensionalen Barrierenmaterialien zum Quantenpunktgrundzustand. Auf Grund der diskreten Energieniveaus im Quantenpunkt ist die phononenassistierte Ladungsträgerrelaxation problematisch, weil im allgemeinen die Energiedifferenz zwischen den diskreten Niveaus ungleich der Energie eines Phonons ist. Ziel dieser Arbeit ist es zunächst, die Mechanismen des Ladungsträgereinfangs von den Barrierenzuständen in den Grundzustand von InAs- bzw. InGaAs-Quantenpunkten in Abhängigkeit von Potentialform, Temperatur und Ladungsträgerdichte experimentell zu ermitteln. Es zeigt sich, daß dieser Einfang schnell verläuft, das heißt auf einer Zeitskala von nur wenigen Pikosekunden. Während bei großen Anregungsdichten der Mechanismus der Ladungsträger-Ladungsträger-Streuung diesen schnellen Ladungsträgereinfang ermöglicht, konnte durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten zeitaufgelösten Messungen erstmals gezeigt werden, daß bei geringen Anregungsdichten der Prozeß der Multiphononenemission eine immer noch hinreichend schnelle Relaxation im Bereich von 3 - 10 ps liefert.

Der zweite Schwerpunkt dieser Arbeit ist die experimentelle Untersuchung der Emissionsdynamik von Quantenpunktlasern. Die wachstumsbedingte Größenverteilung der Quantenpunkte bewirkt einen spektral breiten, inhomogenen Gewinn, der in Quantenpunktlasern zu einer ausgeprägten Sättigung und Verbreiterung der Emissionsspektren führt. Die große spektrale Breite des Gewinns eines InAs/GaAs-Quantenpunktlasers wurde im Rahmen dieser Arbeit ausgenutzt, um einen Quantenpunktlaser mit Hilfe eines externen Resonators bei Raumtemperatur über 80 nm im nahen Infrarot kontinuierlich durchzustimmen.

Die Emissionsdynamik eines elektrisch cw gepumpten Quantenpunktlasers wurde nach Injektion eines optischen Pulses in eine Facette vermessen. Erstmals konnte ein ultraschneller Schaltvorgang demonstriert werden, der auf einer Sub-Pikosekunden-Zeitskala abläuft und auf die Absorption des Quantenpunktlaserlichtes an den optisch erzeugten freien Ladungsträgern zurückgeführt werden kann. Dieser Vorgang wird durch die für Quantenpunkte typische Gewinnsättigung ermöglicht.

Durch optisches Gewinnschalten sowie optisch synchrones Pumpen einer Quantenpunktlaserdiode im externen Resonator wurde eine gepulste Emission eines Quantenpunktlasers erreicht, die mit hoher Zeitauflösung untersucht wurde. Es konnten für einen Quantenpunktlaser erstmalig Pulsbreiten unter 10 ps beobachtet werden. Diese Untersuchungen eröffnen den möglichen Einsatz von Quantenpunktlasern für optoelektronische Anwendungen mit kurzen Pulsen im nahen Infrarot.

1 Einleitung

Die Untersuchung und die Manipulation der Materie auf der Nanometerskala stellt weltweit zur Zeit einen physikalischen Forschungsschwerpunkt von größter Bedeutung dar. Dies hat im wesentlichen zwei Gründe. Zum einen erlauben technologische Fortschritte in der Herstellung und Analyse von Nanostrukturen einen kontrollierten Übergang von der klassischen (makroskopischen) Physik hin zu quantenmechanischen Strukturen auf der Längenskala von nur einigen Nanometern. Hier bewirken Quantisierungseffekte eine Fülle neuer Effekte, die von größtem Interesse für Physiker sind. Ein zweiter wesentlicher Grund für die weltweite Beachtung der Miniaturisierung besteht in der Hoffnung auf verbesserte Eigenschaften von existierenden Bauteilen sowie auf der Entwicklung neuartiger Anwendungen. So wird die Nanotechnologie auch als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts bezeichnet [1].

Ein Beispiel für diese Entwicklung sind Halbleiterlaser. Das Vordringen der Miniaturisierung auf eine Nanometerskala wird auch hier vollzogen. So beruhen Quantenfilmlaser auf der Einschränkung der Bewegung von Ladungsträgern in einem Halbleiter in einer Dimension. Dies führt zu einer Verbesserung der Lasereigenschaften. Die wirtschaftliche Bedeutung von Halbleiterlasern äußert sich darin, daß sie große Beiträge zu der rasanten Entwicklung der Informationstechnologie der letzten Jahre geleistet haben. Gerade die Telekommunikationsbranche hat von dem verbesserten Leistungsverhalten von Quantenfilmlasern profitiert.

Quantenpunkte stellen den ultimativ letzten Schritt in der Einschränkung der Bewegung der Ladungsträger in einem Halbleiter dar: ihre Dimensionen betragen nur wenige Nanometer in allen drei Raumrichtungen. Die dadurch bewirkte Zustandsquantisierung für Elektronen und Löcher hat dramatische Auswirkungen auf die Energiezustände in einem solchen 0-dimensionalen Halbleiter: wie in Atomen können auch in einem Quantenpunkt Ladungsträger nur noch diskrete Energien annehmen. Aus diesem Grund werden derartige Strukturen auch als künstliche Atome bezeichnet. Die Verwendung von Quantenpunkten als aktivem Medium in einem Halbleiterlaser verspricht eine Reihe von Vorteilen. So sind ein großer optischer Gewinn, eine verschwindende Temperaturabhängigkeit der Laserschwelle sowie geringe Schwellströme für Quantenpunktlaser vorhergesagt worden [2, 3]. Die erste Demonstration eines Quantenpunktlasers geschah 1994, wobei das Konzept des selbstorganisierten Inselwachstums angewandt wurde [4]. Die folgenden Jahre brachten eine stetige Verbesserung der Eigenschaften von Quantenpunktlasern, so daß heute der Halbleiterlaser mit der geringsten

Laserschwelle Quantenpunkte als aktives Medium hat [5]. Auch für die Telekommunikationsindustrie versprechen Quantenpunkte großes Potential [6]. Quantenpunktlaser mit einer Emissionswellenlänge bis zu 1.3 μm können auf kostengünstigem GaAs-Substrat hergestellt werden, während für andere Halbleiterlaser im kommunikationstechnisch interessanten Wellenlängenbereich um 1.3 μm bisher das teure InP-Substrat benutzt werden muß.

Im Vergleich zu Volumenhalbleitern hat die Zustandsquantisierung in Quantenpunkten dramatische Konsequenzen auf die Relaxation von Ladungsträgern von angeregten Zuständen in den Grundzustand. Während Ladungsträger in Volumenhalbleiter auf Grund des Kontinuums von Zuständen ihre Energie sehr effizient durch Emission von Phononen abgeben können, ist die phononenassistierte Relaxation von Ladungsträgern in Quantenpunkten problematisch, weil der Abstand der diskreten Energieniveaus im allgemeinen ungleich der Energie eines Phonons ist. Die daraus folgende Verlangsamung der Ladungsträgerrelaxation in diesen Halbleiterstrukturen ist als *Phonon Bottleneck* (Flaschenhals) in die Literatur eingegangen [7, 8]. Die Untersuchung der Mechanismen der Ladungsträgerrelaxation ist von großem Interesse, weil eine schnelle Relaxation von Ladungsträgern aus Zuständen höherer Energie bis in den gebundenen Grundzustand im Quantenpunkt für die Anwendung von Quantenpunkten in der Optoelektronik von größter Bedeutung ist.

Eine der Aufgaben dieser Arbeit besteht darin, die Mechanismen der Ladungsträgerrelaxation in selbstorganisierten Quantenpunkten experimentell aufzuschlüsseln. Hierzu wird der Ladungsträgereinfang mit hoher Zeitauflösung untersucht. Während bei großen Anregungsdichten die Ladungsträger-Ladungsträger-Streuung eine Relaxation auf einer Zeitskala von einigen Pikosekunden ermöglicht, kann im Rahmen dieser Arbeit durch zeitaufgelöste Messungen erstmals gezeigt werden, daß bei niedrigen Anregungsdichten die Emission von mehreren longitudinal-optischen bzw. longitudinal-akustischen Phononen eine immer noch schnelle Relaxation von weniger als 10 ps ermöglicht. Durch diese Messungen ist gezeigt, daß der Phonon Bottleneck kein gravierendes Problem für Quantenpunktlaser darstellt.

Ein wichtiges Ziel der vorliegenden Arbeit ist weiterhin die Analyse der Emissionsdynamik von Quantenpunktlasern. Auf Grund der herstellungsbedingten Größenfluktuation von realen Halbleiterquantenpunkten ist die Emission eines Quantenpunktlasers typischerweise durch ein spektral breites Gewinnspektrum und eine deutliche Gewinnsättigung gekennzeichnet. Die Folgen dieser Eigenschaften auf die Emissionsdynamik von Quantenpunktlasern sind allerdings weitgehend unbekannt.

Die vorliegende Arbeit versucht, diese Lücke zu schließen, und stellt umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Dynamik von Quantenpunktlasern vor. So wird gezeigt, daß die Gewinnsättigung einen entscheidenden Einfluß auf die Emissionsdynamik von Quantenpunktlaserdioden hat. Nach Injektion eines optischen Pulses in eine Laserfacette bewirkt die Gewinnsättigung, daß die freien Ladungsträger das Laserlicht des Quantenpunktlasers absorbieren; die Laserdiode kann dadurch in einem Zeitraum von weniger als einer Pikosekunde ausgeschaltet werden, was bisher bei noch keiner anderen Halbleiterlaserdiode beobachtet wurde. Die gepulste Emission von Quantenpunktlasern, die durch optisches Gewinnschalten

sowie optisch synchrones Pumpen in einem externen Resonator herbeigeführt wird, wird hier erstmalig untersucht. Mit minimalen Pulsbreiten kleiner als 10 ps wird mit einem Quantenpunktlaser erstmals der Zeitbereich von herkömmlichen gepulsten Laserdioden erreicht.

Die vorliegende Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut. In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen zum Verständnis gelegt. Hier wird sowohl auf die Herstellung und Eigenschaften von *individuellen* Quantenpunkten eingegangen, als auch die Anwendung eines großen *Ensembles* von Quantenpunkten als aktivem Medium in einem Halbleiterlaser behandelt. Dies geschieht insbesondere unter Berücksichtigung der oben angesprochenen Größenverteilung der Quantenpunkte. Es wird ein orts- und zeitaufgelöstes Ratengleichungssystem aufgestellt, das die Berechnung der Dynamik von Laserdioden erlaubt, und in dem insbesondere der Effekt der nichtlinearen Gewinnsättigung berücksichtigt werden kann.

Die Herstellung der in dieser Arbeit verwendeten Quantenpunkt- und Laserproben wird in Kapitel 3 beschrieben. Kapitel 4 behandelt die grundlegenden experimentellen Methoden. Eine besondere experimentelle Herausforderung stellt die zeitaufgelöste Spektroskopie mittels der Femtosekunden-Aufkonversion dar, die eine Zeitauflösung von bis zu 250 fs ermöglicht.

In Kapitel 5 wird eine Analyse des zeitaufgelösten Ladungsträgereinfanges in die Quantenpunkte durchgeführt. Hierbei wird nicht nur die Rolle von Potentialform und -tiefe, sondern auch der Ladungsträgerdichte und der Phononenemission zur Überwindung des oben angesprochenen Phonon Bottleneck herausgearbeitet.

Während Kapitel 5 die Eigenschaften individueller Quantenpunkte und die Relaxationsmechanismen darin zum Thema hat, beschäftigen sich die Kapitel 6, 7 und 8 mit Quantenpunkten als aktivem Material in einem Halbleiterlaser. Dazu wird zunächst in Kapitel 6 die kontinuierliche Emission einer Quantenpunktlaserdiode im Hinblick auf die Gewinnsättigung untersucht. Der spektral breite optische Gewinn wird ausgenutzt, um mit Hilfe eines externen Gitters einen kontinuierlich durchstimmbaren Quantenpunktlaser zu realisieren.

Die denkbare Anwendung von Quantenpunktlasern im Bereich der Nachrichtenübertragung motiviert die zeitaufgelöste Untersuchung der Emission von Quantenpunktlasern in den Kapiteln 7 und 8. Kapitel 7 beschäftigt sich dabei mit der Emissionsdynamik von Quantenpunktlaserdioden. Unter anderem kann hier ein einzigartiger ultraschneller Schaltvorgang demonstriert werden, der auf einer Zeitskala unter einer Pikosekunde abläuft. In Kapitel 8 wird ein optisch gepumpter Quantenpunktlaser in einen externen Resonator gebracht. Durch synchrones Pumpen kann hier erstmals ein gepulster Quantenpunktlaser gezeigt werden, der sub-10 ps Pulse erzeugt.

Kapitel 9 schließt diese Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick ab.