

Zusammenfassung

Kohärente optische Manipulationen einzelner Halbleiter-Quantenpunkte gewinnen zunehmend an Bedeutung, nicht nur aus Sicht der Grundlagenforschung sondern auch mit Blick auf mögliche Anwendungen in festkörperbasierter Quanten-Informationsverarbeitung. Als Grundlage zahlreicher Experimente dient dabei das theoretische Modell eines Zwei-Niveau-Systems, welches hier konkret durch An- bzw. Abwesenheit eines einzelnen Exzitons im Grundzustand eines InGaAs/GaAs-Quantenpunkts definiert ist.

Übergänge zwischen den beiden Niveaus werden durch resonante optische Anregung induziert. Da die Quantenpunkte in eine Diodenstruktur integriert sind, kann die Detektion elektrisch über Messung des Photostroms erfolgen. Dieser Detektionsmechanismus ist nicht nur sehr empfindlich sondern erlaubt unter gewissen Bedingungen auch eine quantitative Messung des Besetzungszustands. Darüber hinaus können die Energieniveaus des Quantenpunkts aufgrund des Stark-Effekts durch Variation einer extern angelegten Spannung sehr präzise gegenüber einer festen Laserenergie abgestimmt werden. Der Ein-Exziton-Übergang erscheint dabei im Photostrom als extrem schmale Resonanz von nur wenigen μeV Breite.

Im Fall von kontinuierlicher, resonanter Anregung zeigt die Besetzungswahrscheinlichkeit des oberen Niveaus bei hohen Intensitäten ein charakteristisches Sättigungsverhalten. Als direkte Folge dieser Sättigung wird, in exakter Übereinstimmung mit der theoretischen Erwartung, eine Verbreiterung der Absorptionslinie beobachtet. Durch die vorgestellten Messungen wird einerseits die theoretische Beschreibung des Quantenpunkts als Zwei-Niveau-System experimentell bestätigt, andererseits können grundlegende Systemparameter wie Tunnelzeiten und Feinstrukturaufspaltung bestimmt werden.

Zur Untersuchung kohärenter Wechselwirkungen zwischen Quantenpunkt und Lichtfeld erfolgt die Anregung mit ps-Laserpulsen, also auf Zeitskalen deutlich kürzer als die Dephasierungszeit. Das grundlegende Experiment in diesem Zusammenhang ist die Beobachtung von Rabi-Oszillationen, mit denen jeder beliebige Überlagerungszustand der beiden Niveaus gezielt eingestellt werden kann. In dieser Arbeit wurden erstmals an einem Halbleitersy-

stem Rabi-Oszillationen mit geringer Dämpfung bis zu einer Pulsfläche von fast 9π nachgewiesen.

In Hinblick auf Quanten-Computing besonders interessant sind Quanten-Interferenzexperimente. Dabei wird zunächst durch einen ersten Puls eine Überlagerung der beiden möglichen Zustände erzeugt, deren kohärente Entwicklung dann mit Hilfe eines zweiten Pulses abgefragt werden kann. In Abhängigkeit von der Verzögerungszeit des zweiten Pulses beobachtet man einen exponentiellen Abfall der Interferenzamplitude entsprechend der Dephasierungszeit des Systems. Je nach Polarisation der Anregung ist diese exponentielle Abhängigkeit noch mit einer Schwebung aufgrund der Feinstrukturaufspaltung des Exzitons moduliert. Trotz eines Unterschieds von mindestens fünf Größenordnungen in der Anregungsleistung stimmen alle Ergebnisse aus kohärenten, gepulsten Messungen quantitativ mit den zuvor im stationären Grenzfall bestimmten Systemparametern überein. Insbesondere kann die Dephasierungszeit über die Probenspannung variiert werden und erreicht Werte bis zu einigen hundert Pikosekunden.

Die phasensensitive Messung in Doppelpuls-Experimenten ist äußerst empfindlich gegenüber einer Verstimmung zwischen Laser und Quantenpunkt-Resonanz. Bei Variation der Quantenpunktenergie über den Stark-Effekt beobachtet man Ramsey-Interferenzen, deren Periode umso schmaler wird, je größer der Zeitabstand zwischen den beiden Pulsen ist, im Extremfall sogar schmaler als die natürliche Linienbreite des Übergangs. Bei Anregung mit zeitlich überlappenden Pulsen kann darüber hinaus schon eine Abweichung zwischen Quantenpunkt- und Laserenergie von nur wenigen Prozent der spektralen Breite der Anregungspulse nachgewiesen werden.

Der gebundene Zustand aus zwei Exzitonen in einem Quantenpunkt (Biexziton) kann über einen resonanten, kohärenten Zwei-Photon-Prozess kontrolliert werden. Im Gegensatz zur konventionellen kohärenten Entwicklung eines Zwei-Niveau-Systems zeigt die Rabi-Oszillation des Biexzitons eine komplexere Abhängigkeit nicht nur von der Laserleistung sondern auch von der genauen Form der Pulse. Experimentelle Ergebnisse werden durch eine theoretische Rechnung gut beschrieben, welche einzig auf grundlegenden Systemparametern basiert. Die Dephasierungszeit des Biexzitons liegt im selben Bereich wie die des einzelnen Exzitons.

Insgesamt bietet die Verwendung eines elektrisch kontaktierten Quantensystems nicht nur wichtige experimentelle Vorteile, sondern könnte in Zukunft auch eine Verbindung zwischen klassischer Halbleitertechnologie und neuartigen, kohärenten Bauelementen im Bereich der Quanten-Informationsverarbeitung darstellen.