

Abschlussbericht

nanoQUIT:

Entwicklung von quantenpunktbasierenden Einzelphotonenquellen für Emissionswellenlängen um 1,55 μm

Zuwendungsempfänger: Dr. Ralf Meyer, Walter Schottky Institut, Technische Universität München	Förderkennzeichen: 01BM471
Vorhabenbezeichnung: Förderschwerpunkt: nanoQUIT Teilvorhaben: Entwicklung von quantenpunktbasierenden Einzelphotonenquellen für Emissionswellenlängen um 1,55 μm	

Laufzeit des Vorhabens:
01.01.2005 bis 31.12.2008

Teil 1

1 Ziel des Projektes

Ziel dieses Teilvorhabens im Rahmen des Förderschwerpunktes nanoQUIT war die Realisierung einer hocheffizienten, elektrisch gepumpten Einzelphotonenquelle bei der für Telekommunikationsanwendungen wichtigen Wellenlänge von 1,55 μm . Im Rahmen des von uns favorisierten Konzepts sollten dazu Quantenpunkte als Emitter in einen photonischen Kristall eingebettet und elektro-optisch mit einer monolithisch integrierten LED gepumpt werden. Für die Umsetzung dieses Konzeptes waren zuvor eine Reihe von materialwissenschaftlichen und prozesstechnologischen Fragestellungen wie die Abscheidung von Quantenpunkten auf InP-Basis oder die Herstellung der entsprechenden photonischen Kristalle, sowie ihre Wechselwirkung miteinander, zu untersuchen.

Konzept einer effizienten Einzelphotonenquelle:

Für die Erzeugung einzelner Photonen ist ein Quantenemitter notwendig. Ein halbleiterbasierender Quantenpunkt bildet angesichts seiner atomartigen elektronischen Struktur die Möglichkeit der Einzelphotonenemission und soll daher die Grundlage der Einzelphotonenquelle bilden. Da eine punktförmige, isotrope Lichtquelle in alle Raumrichtungen abstrahlt, aber nur wenige Photonen aufgrund des hohen Brechungsindexunterschieds zwischen Halbleiter und Luft den Halbleiter verlassen können, ist es zur Effizienzsteigerung notwendig, den Quantenpunkt in eine geeignete photonische Umgebung einzubetten, um so die Emission richten zu können. Photonische Kristalle bieten die Möglichkeit die photonische Umgebung des Quantenpunktes maßzuschneidern und stellen gleichzeitig Resonatoren hoher Güte dar. Auf diese Weise kann die Emission in den Halbleiter unterdrückt und gleichzeitig die Abstrahlung in die Resonatormode verstärkt werden. Dabei sind allerdings die Emission des Quantenpunktes wie auch die Resona-

tormode spektral äußerst scharf definiert. Die verschiedenen Fertigungstoleranzen erlauben es jedoch nicht, dass die Quantenpunkte und der photonische Kristall von Hause aus so präzise zu fertigen sind, dass ihre Resonanz garantiert ist. Es muss daher eine Möglichkeit bestehen, die beiden Teile, Emitter und Resonator, nachträglich spektral aufeinander abzustimmen. Dazu wurden bisher sowohl thermische Abstimmung, als auch eine Abstimmung des Resonators über Gaskondensation eingesetzt. Im Gegensatz zu diesen eher statischen Ansätzen soll in unserem Konzept, mit einem schnellen Mechanismus die Quantenpunktemission in die optische Mode des Resonators geschoben werden um so dynamisch eine schnelle und deterministische Emission der einzelnen Photonen zu erzwingen. Daher verwenden wir den *Quantum Confined Stark Effects* (QCSE). Dabei wird ein elektrisches Feld über einen Schottky-Kontakt in Sperrrichtung angelegt und so die Emission des Quantenpunktes zu längeren Wellenlängen hin verschoben. Da aber dadurch eine gleichzeitige elektrische Befüllung des Quantenpunktes mit Ladungsträgern nicht möglich ist, sollen diese optisch, direkt am Ort des Quantenpunktes, mittels eines Lichtpulses erzeugt werden. Das Konzept sieht vor, diesen Lichtpuls in einer darunterliegenden, monolithisch integrierten LED zu erzeugen und ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

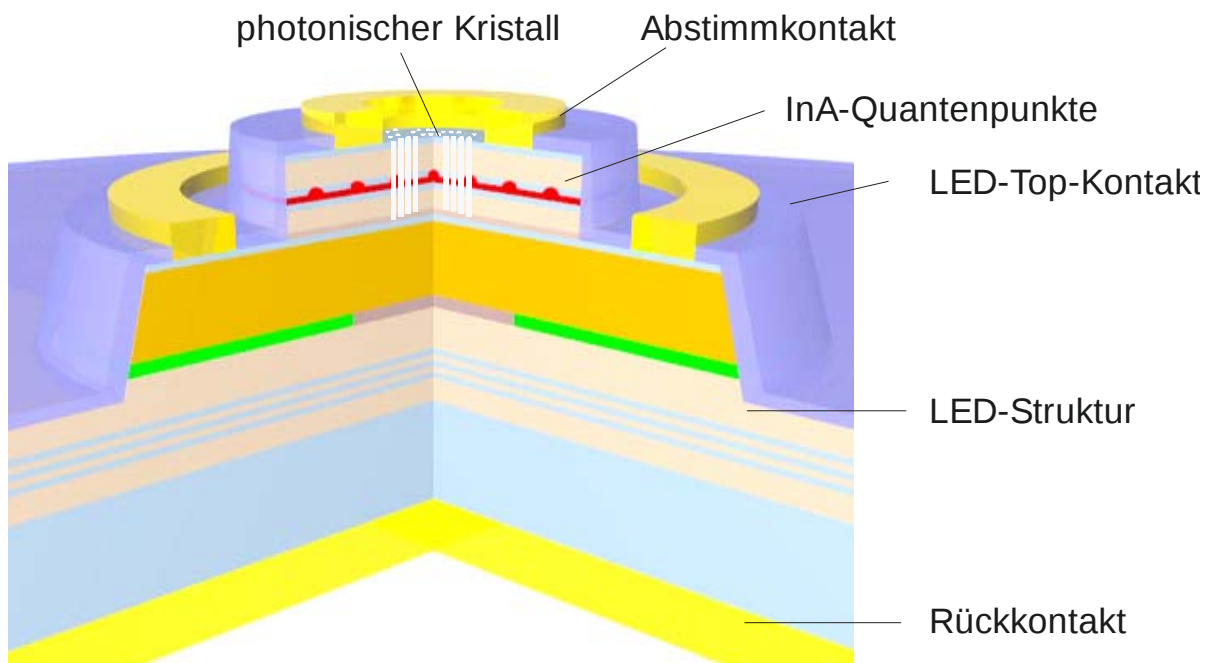


Abb. 1: Favorisiertes Konzept bestehend aus Quantenpunkten, Resonator und LED

2 Ursprünglicher Arbeitsplan

Die im Rahmen dieses Projektes notwendigen Arbeiten ließen sich zwei völlig unterschiedlichen Bereichen zuordnen. Einerseits waren es materialwissenschaftliche Fragen, die gelöst werden mussten, also wie z.B. Quantenpunkte mit einer Emissionswellenlänge um $1,5\text{ }\mu\text{m}$ realisiert werden können und wie Resonatoren in den entsprechenden Materialien zu fertigen sind. Andererseits stand die Evaluierung des Konzepts für ein Bauelement an, was zumindest grundsätzlich von der Materialfrage als unabhängig angesehen werden kann. Die beiden Themenbereiche wurden daher parallel bearbeitet. Zu Beginn des Projektes gehörte die Herstellung von Quantenpunkten mit Emissionswellenlängen von $1,55\text{ }\mu\text{m}$ nicht zum Stand der Technik. Weil aber schon zu Beginn des Projektes Herstellungsprozesse für kurzweilig emittierende Quantenpunkte (bei ca. 900nm) in geringer Oberflächendichte, sowie die Herstellung photonischer Kristalle auf Galliumarsenid (GaAs)-Basis bekannt waren, konnte schon in einer frühen Phase des Projekts auch mit der Evaluierung des Bauelementkonzeptes auf GaAs-Basis begonnen werden.

Beschreibung der Meilensteine im Einzelnen:

Meilenstein 1: Wachstum von Quantenpunkten mit Emissionswellenlängen um $1,55\text{ }\mu\text{m}$
Zu diesem Zeitpunkt sollten nach Optimierung der Wachstumsparameter die Abscheidung von Quantenpunktstrukturen, deren Emissionswellenlänge des Grundzustandes um $1,55\text{ }\mu\text{m}$ liegt, reproduzierbar möglich sein (Monat 12 der Projektlaufzeit, M12).

Meilenstein 2: Strukturen mit niedriger Quantenpunktdichte
Durch Veränderung der Abscheidebedingungen sollten nun auch Strukturen mit niedrigen Quantenpunktdichten herstellbar sein (M18).

Meilenstein 3: Herstellung 2-dimensionaler photonischer Kristalle
Ausgehend von teilweise bereits vorhandenem Know-How bei der trockenchemischen Strukturierung von (AlGaIn)As/InP-Heterostrukturen sollte zu diesem Zeitpunkt die Herstellung von 2-dimensionalen photonischen Kristallen mit definierten Eigenschaften auf InP-Basis zuverlässig möglich sein (M18).

Meilenstein 4: Fertigung von Mikroresonatoren
Zum Ende des 24-ten Monats der Projektlaufzeit sollte das Design und die Technologieentwicklung zur Fertigung von kompletten Mikroresonatoren mit einem Wellenleiter, Quantenpunkten als aktivem Material und DBR-Spiegeln abgeschlossen worden sein (M24).

Meilenstein 5: Single-Photon-Counting bei Wellenlängen bis $1,5\text{ }\mu\text{m}$
Zeitgleich sollte der bereits vorhandene Messplatz für die Einzelphotonenzählung durch den Einsatz neuartiger Detektoren auf Wellenlängen bis zu $1,5\text{ }\mu\text{m}$ erweitert worden sein (M24).

Meilenstein 6: Spannungsgesteuerte Mikroresonatoren mit Quantenpunkten

Zu diesem Zeitpunkt soll ein elektrischer Abstimmmechanismus zwischen Quantenpunkt-emission und Resonatormode entwickelt worden sein.

Meilenstein 7: Photon-Anti-Bunching

Mit den in Meilenstein 6 gefertigten, optisch gepumpten und elektrisch abstimmbaren Mikroresonatoren sollte der Effekt des „Photon-Antibunchings“ in der Emission von einzelnen Quantenpunkten in einer optisch gepumpten Mikrokavität demonstriert worden sein (M36).

Meilenstein 8: Optisch gepumpte Einzelphotonenquelle

Zu diesem Zeitpunkt sollte ein Demonstrator einer optisch gepumpten, hocheffizienten Einzelphotonenquelle realisiert worden sein (M42).

Meilenstein 9: Evaluierung der Fertigung elektrisch gepumpter Einzelphotonenquellen
Aufbauend auf den Ergebnissen mit optisch gepumpten Einzelphotonenquellen sollten die Voraussetzungen für die Fertigung einer elektrisch gepumpten Quelle evaluiert worden sein (M48).

Aufgabe	2005	2006	2007	2008
Epitaxie				
Abscheidung von Quantenpunkten auf InP	M1			
Herstellung von Quantenpunktstrukturen mit niedriger Dichte		M2		
Technologie				
Herstellung photonischer Kristalle auf InP-Basis		M3		
Fertigung von Mikroresonatoren			M4	
Herstellung von Mikrokontakten				
Optische Charakterisierung				
Photolumineszenzspektroskopie an einzelnen Quantenpunkten				
Optimierung der Einzelphotonenzählung für 1,3 - 1,5µm			M5	
Photonkorrelationsspektroskopie				M7
Bauelemente				
Spannungsgesteuerte Mikroresonatoren mit Quantenpunkten				M6
Optisch gepumpte Einzelphotonenquellen				M8
Evaluierung von Konzepten zur Fertigung elektrisch gepumpter Einzelphotonenquelle				M9

Tabelle 1: Arbeitsplan laut Antrag

3 Technischer Stand zu Beginn des Projektes

Zu Beginn des Projektes waren grundlegende wachstumsrelevante Parameter wie Wachstumsrate, Temperatur, V-III-Verhältnis und Oberflächenbedeckung für die Bildung von selbstorganisierten (Ga)InAs-Quantenpunkte auf GaAs-Substrat bekannt [1]. Des Weiteren konnten geringe Oberflächendichten der Quantenpunkte erreicht werden. Die Emissionswellenlänge solcher Quantenpunkte lag allerdings bei etwa 900 nm. Solche Quantenpunkte konnten in neutralem und geladenem Zustand [2] mittels Mikrophoto-lumineszenzmessungen untersucht werden. Für die Herstellung von langwelligen InAs-Quantenpunkten auf InP-Basis gab es allerdings noch keine Erkenntnisse. Daher musste auf diesem Gebiet noch fundamentale Entwicklungsarbeit geleistet werden. Die Charakterisierung von langwelligen Quantenpunkten erforderte den Aufbau neuer Messplätze und die Anschaffung neuer Detektoren.

Auch wurden erste Versuche zur Herstellung und Charakterisierung von photonischen Kristallen auf GaAs-Basis durchgeführt, jedoch waren noch keine Kenntnisse über die Herstellung von Nanostrukturen auf InP-Basis vorhanden. Allerdings waren viele bekannte Elemente der Prozesstechnologie auf InP-Basis, aufgrund der erfolgreichen Herstellung von InP-basierenden VCSELn an unserem Lehrstuhl, auch für die Entwicklung eines Bauteils für eine Einzelphotonenquelle nutzbar.