

# Schlußbericht

BMBF-Förderschwerpunkt:  
Quantenstruktursysteme auf der Basis von III-V-Halbleitern

Firma:  
Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Berlin

Teilvorhaben:  
Quantendrähte und Quantenpunkte durch Überwachsen von lateral strukturierten nicht-[100]-orientierten Substraten und Schichtsystemen

Förderkennzeichen  
01 BM 617/1

Laufzeit:  
01.04.1996 - 29.02.2000

Bereichsleiter:  
Prof. Dr. K. v. Klitzing

Projektleiter:  
Dr. R. Nötzel

Bearbeiter:  
Dr. J. Fricke, Dr. U. Jahn, Dr. Z.C. Niu, Dr. M. Ramsteiner,  
Dipl.-Ing. H.P. Schönherr, Dr. A. Trampert

## 1. Aufgabenstellung

Das Vorhaben zielte auf die Herstellung von Quantendrähten und Quantenpunkten durch Überwachsen von lateral strukturierten, nicht-[100]-orientierten (hoch-indizierten) GaAs-Substraten mittels Festquellen-Molekularstrahlepitaxie (MBE) unter Einwirkung von atomarem Wasserstoff. Im Verlauf des Projektes sollten, basierend auf neuartigen selbstorganisierenden Wachstumsmechanismen auf strukturierten nicht-[100]-orientierten GaAs-Substraten und in wasserstoffunterstützter MBE Quantendrähte und Quantenpunkte mit verbesserten strukturellen und insbesondere elektronischen Eigenschaften realisiert werden, die bis Raumtemperatur durch den lateralen Einschluß der Ladungsträger bestimmt sind.

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Für das Schichtwachstum stand eine 10 Jahre alte drei-Kammer MBE-Anlage zur Verfügung. Zu Beginn des Projektes wurde eine Wasserstoffquelle installiert. Zur Strukturierung der Substrate waren optische Lithographie und naßchemisches Ätzen bereits etabliert. Während des Projektes wurden Elektronenstrahlolithographie und trockenchemisches Ätzen entwickelt.

Zur Untersuchung der strukturellen Eigenschaften der Quantendrähte und Quantenpunkte standen Rasterelektronenmikroskopie (SEM), Rasterkraftmikroskopie (AFM) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) zur Verfügung, sowie zur Untersuchung der elektronischen Eigenschaften mikro-Photolumineszenz (mikro-PL), Kathodolumineszenz (CL), Hall-Effekt- und Magnetotransport Meßplätze.

## **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Planung und Ablauf des Vorhabens wurden, wie im Projektantrag beschrieben durchgeführt. Die geplanten Ziele wurden im angegebenen Zeitplan erreicht.

## **4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde**

Grundlage der Arbeiten waren unsere Erfahrungen zum Wachstum auf planaren, nicht-[100]-orientierten Substraten mittels MBE (R. Nötzel, N. Ledentsov, L. Däweritz, M. Hohenstein, K. Ploog, Phys. Rev. Lett. 67, 3812 (1991)) und metalorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) (R. Nötzel, J. Temmyo, T. Tamamura, Nature 269, 131 (1994)) zur Erzeugung selbstorganisierter lateraler Nanostrukturen. Insbesondere waren dies die Herstellung korrugierter Übergitter mit mikroskopisch gestuften Grenzflächen mittels MBE, sowie die akkumulation derartiger Stufensysteme mittels MOVPE zur Erzeugung von Quantendrähten und Quantenpunkten mit lateralen Abmessungen auf der mesoskopischen Längenskala und die Herstellung verspannter, vergrabener (InGa)As Quantenpunkte.

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Am Zentrum für Mikrostrukturforschung der Universität Hamburg wurde die holographische Strukturierung der GaAs-Substrate für die Herstellung lateraler Quantendrähte mit einer lateralen Periode von 500 nm durchgeführt.

## 6. Erzielte Ergebnisse

### 6.1. Wachstum und optische Eigenschaften lateraler Quantendrähte auf strukturierten GaAs (311)A-Substraten

Am Beginn unserer Arbeiten zum Wachstum auf strukturierten nicht-[100]-orientierten Substraten stand die Untersuchung der GaAs (311)A-Oberfläche. 80  $\mu\text{m}$  breite und 400 nm hohe Mesastreifen wurden mittels optischer Lithographie und naßchemischem Ätzen präpariert und anschließend mit einer Schichtfolge von 5 x 100 nm (AlGa)As/100 nm GaAs überwachsen. Dabei stellte sich heraus, daß sich die Selektivität des Wachstums grundsätzlich von der auf strukturierten GaAs (100)-Substraten unterscheidet. Auf strukturierten [100]-orientierten Substraten ist die Selektivität des Wachstums stets durch die Ausbildung langsam wachsender Facetten auf Grund der Migration von Ga-Atomen von Mesakanten weg in Gräben (V-Graben-Quantendrähte) oder auf Stege gegeben. Im Gegensatz dazu entwickelt sich auf strukturierten GaAs (311)A-Oberflächen für Mesakanten entlang [01-1] auf einer Seite eine Kante mit einer höheren Wachstumsrate als diejenige in den benachbarten flachen Bereichen (Abb. 1(a)). Durch die bevorzugte Migration von Ga-Atomen von beiden Seiten auf die Mesakante zu entwickelt sich hier eine konvex gekrümmte Oberfläche mit extrem geringer Kantenrauigkeit, die keine Bildung von Facetten zeigt (Abb. 1(b)). Für GaAs/(AlGa)As Vielschichtsysteme schließt das Oberflächenprofil dickere, drahtähnliche GaAs-Bereiche entlang der Mesakante ein, die lateral von dünneren GaAs-Quantenwell-Bereichen umgeben sind, die als Barriere wirken. An der gegenüberliegenden Mesakante, sowie für Mesastreifen entlang der senkrechten [-233]-Richtung entstehen langsam wachsende Facetten, wie auf strukturierten (100)-Substraten. Darüber hinaus zeigten weitergehende Untersuchungen, daß Mesastreifen auf strukturierten GaAs (211)A, (311)B, (411)A und (511)A-Substraten, unabhängig von ihrer Richtung, ausschließlich langsam wachsende Facetten ausbilden.

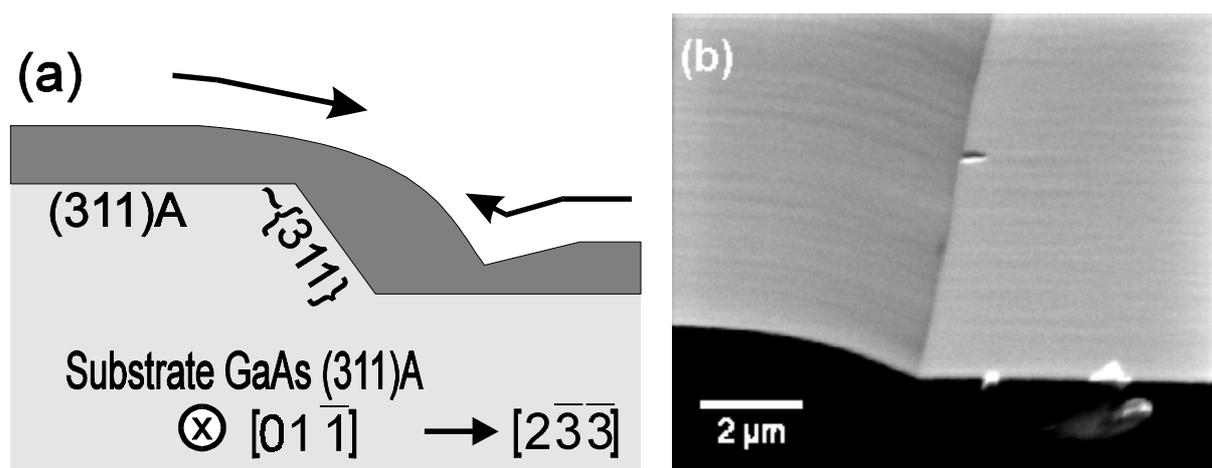
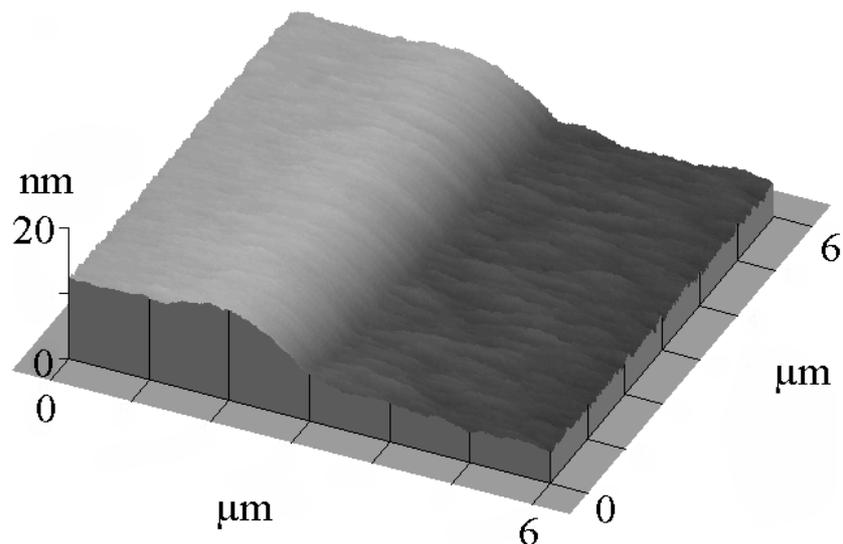


Abb.1. (a) Schematische Darstellung des Wachstumsmodus der schnell wachsenden Mesakante auf strukturierten GaAs(311)A-Substraten und (b) rasterelektronenmikroskopische (SEM) Aufnahme des konvex gekrümmten Oberflächenprofils.

Die Bildung der schnell wachsenden Mesakante, die also einzigartig für die [311]-Substratorientierung ist, wurde direkt zur Herstellung lateraler, quasi-planarer Quantendrähte entlang Mesakanten mit einer Höhe von 10-15 nm genutzt. Die Schichtfolge bestand aus einer 50 nm dicken GaAs-Pufferschicht gefolgt von zwei 50 nm dicken  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ -Barrieren, die eine nominell 6 nm dicke GaAs-Schicht einschließen, und einer 20 nm dicken GaAs-Deckschicht. Abb. 2(a) zeigt die rasterkraftmikroskopische (AFM) Aufnahme des Oberflächenprofils der Schichtfolge. Deutlich zu erkennen ist der Erhalt des konvex gekrümmten Profils selbst bei derartig geringen Mesahöhen. Es ist wiederum keine Aufrauung der Oberfläche an der Kante verglichen mit den planaren Bereichen festzustellen. Die transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Aufnahme des Querschnitts der Struktur, aufgenommen entlang [01-1], zeigt direkt die Ausbildung der GaAs-Quantendrahtstruktur entlang der Mesakante mit einer lateralen Ausdehnung von nur 40-50 nm und einer Höhe von etwa 12 nm.

(a)



(b)

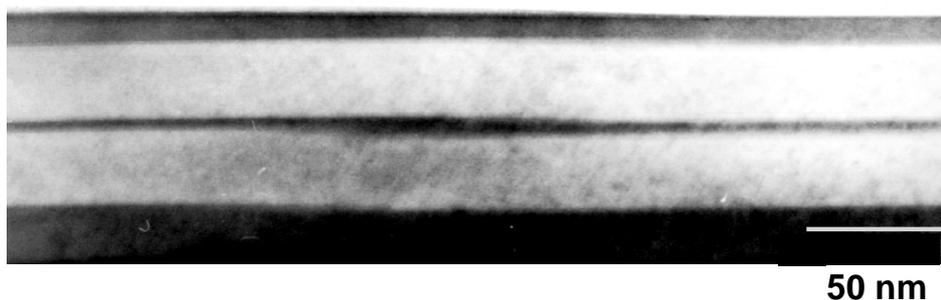


Abb. 2. (a) AFM-Aufnahme der Oberfläche der lateralen Quantendrahtstruktur, (b) TEM-Querschnittsaufnahme entlang [01-1].

Die hervorragende strukturelle Qualität und Homogenität der Quantendrahtstruktur kommt in örtlich und spektral aufgelösten Kathodolumineszenz (CL)- und mikro-Photolumineszenz (mikro-PL) - Messungen zum Ausdruck (Abb. 3). Die Quantendrahtstruktur besitzt PL-Linienbreiten, die mit denen des Quantenwells in den flachen Bereichen vergleichbar sind. Die PL-Effizienz ist hoch und zeigt zwischen 6 K und Raumtemperatur eine Abnahme von nur ein bis zwei Größenordnungen, ähnlich der des Quantenwells. Mikro-PL-Linienprofile weisen den Einschluß der Ladungsträger in der Quantendrahtstruktur bis zu Raumtemperatur nach.

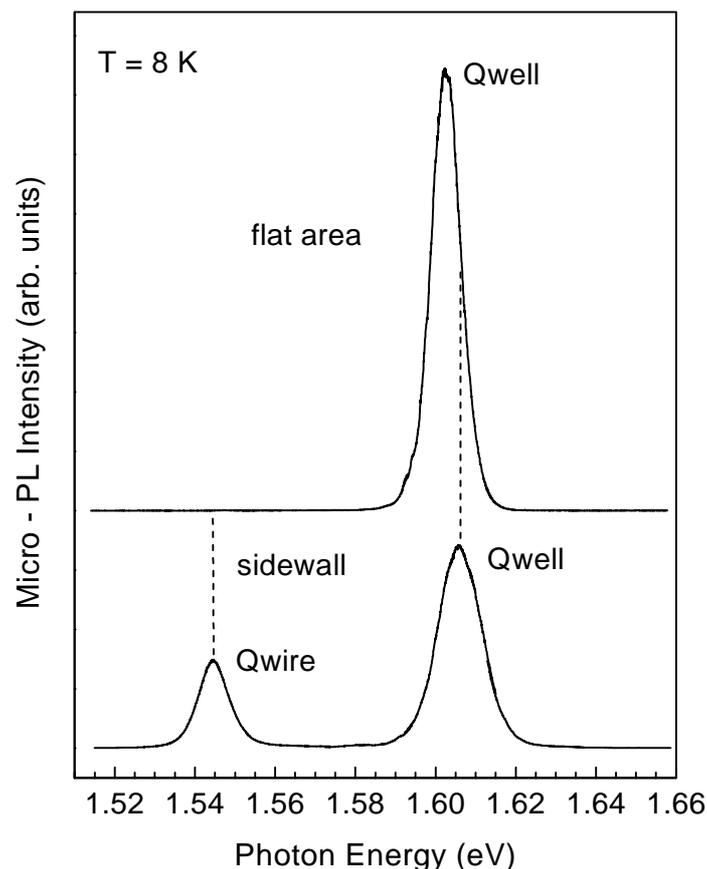


Abb. 3. Mikro-PL-Spektren der lateralen Quantendrahtstruktur bei 8 K in den flachen Bereichen (oben) und an der schnell wachsenden Mesakante (unten).

Der zweidimensionale Einschluß von Ladungsträgern in den Quantendrähten konnte durch PL-Messungen im Magnetfeld eindeutig nachgewiesen werden. Oberhalb von 2 T zeigt die Verschiebung der PL-Linie einen deutlichen Übergang von schwacher zu starker Magnetfeldabhängigkeit durch Überwiegen des magnetischen Einschlusses (Abb. 4). Der entsprechende Zyklotronradius von 40 nm ist dabei in guter Übereinstimmung mit der geometrischen Breite der Drähte.

Große Flexibilität bei der Kontrolle der strukturellen und elektronischen Eigenschaften der lateralen Quantendrahtstruktur zeigte sich in der systematischen Verschiebung der CL-Energie mit der durch die Präparation vorgegebenen Mesahöhe. Abb. 5 zeigt den Anstieg der Blauverschiebung der CL des Quantenwells nahe der Kante, der Rotverschiebung der CL des Drahtes und der lateralen Einschlußenergie mit der Mesahöhe. Im Vergleich zu V-Graben- oder Steg-Strukturen ist die Mesahöhe hier ein

zusätzlicher, von außen bestimmbarer Parameter die Eigenschaften der lateralen Quantendrahtstruktur gezielt einzustellen.

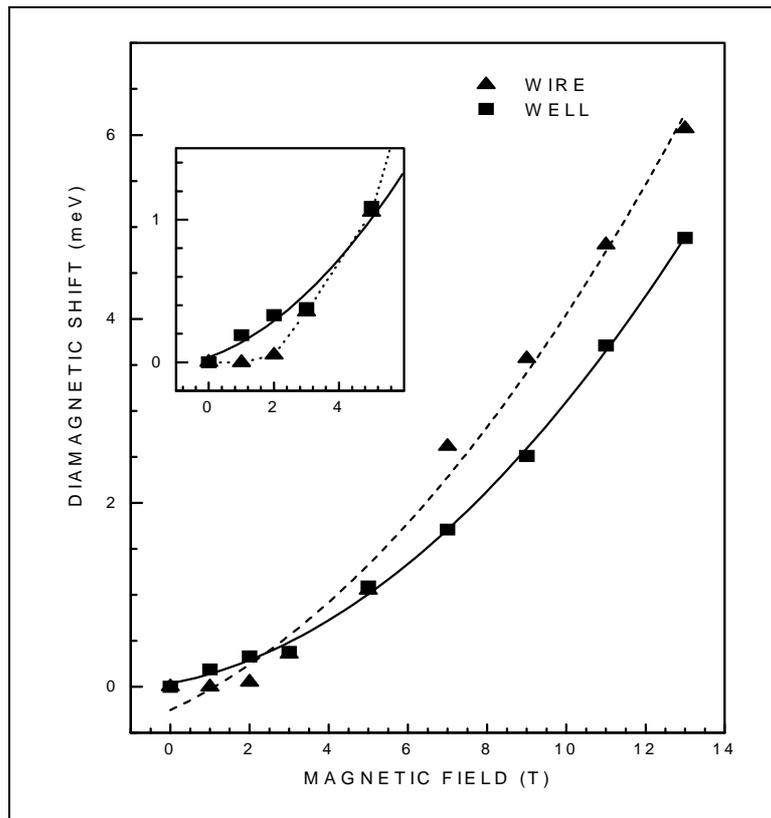


Abb. 4. Abhängigkeit der PL-Energie des Quantenwells und des Quantendrahtes vom Magnetfeld. Die Magnetfeldrichtung ist senkrecht zur Probenoberfläche.

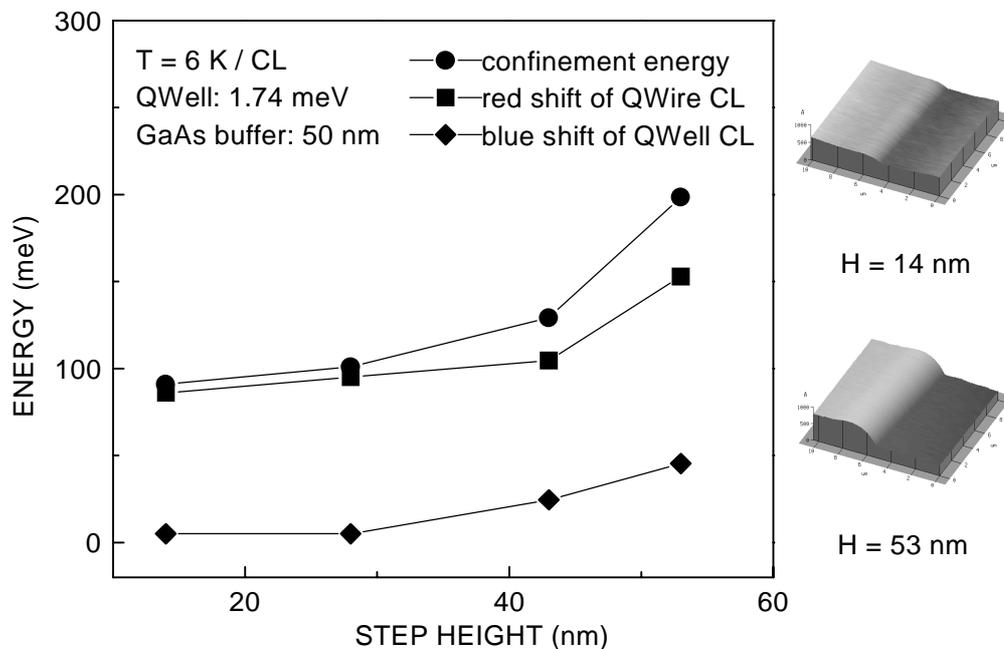


Abb. 5. Verschiebung der CL-Energie in Abhängigkeit von der Mesahöhe. Einsatz: AFM-Aufnahmen der Oberfläche der Quantendrahtstruktur für 14 und 53 nm Höhe.

## 6.2. Dreidimensionale Anordnungen lateraler Quantendrähte auf strukturierten GaAs (311)A-Substraten

Im Hinblick auf eine Erhöhung der Dichte der Quantendrähte in dreidimensionalen Anordnungen ist es besonders wichtig, daß die Drähte in Wachstumsrichtung gestapelt werden können. Um dies zu demonstrieren wurde eine Vielschichtstruktur aus drei übereinander gestapelten Drähten entlang 80  $\mu\text{m}$  breiten und 20 nm hohen Mesastreifen hergestellt und mit einer Einfachschicht

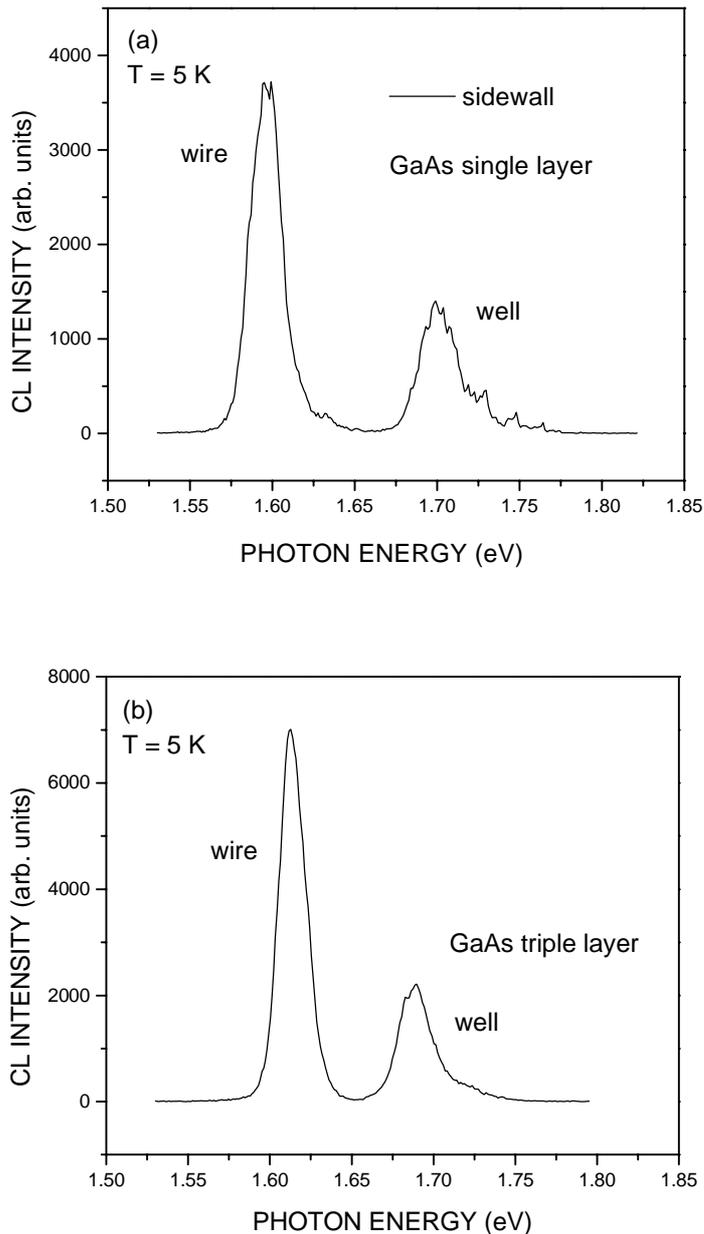


Abb. 6. CL-Spektren von (a) einem- und (b) drei gestapelten Quantendrähten.

verglichen. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit auf Änderungen der Form der Drähte, sowie der Beschaffenheit der Grenzflächen betrug die nominelle GaAs-Schichtdicke

nur 2 nm. Abb. 6 (a,b) zeigt die CL-Spektren beider Strukturen im Vergleich. Die unverändert schmale Linienbreite für ein- und drei Drähte zeigt, daß die Drähte unter Beibehaltung ihrer Form und Qualität der Grenzflächen in Wachstumsrichtung gestapelt werden können und verdeutlicht damit den selbstlimitierenden Charakter des lateralen Wachstumsmechanismus, der sich schon in der konvexen Form der Oberfläche angedeutet hat.

Denkt man an den Einsatz der Quantendrahtstruktur als aktive Zone in Bauelementen, ist es notwendig, die Dichte der Drähte auch lateral zu erhöhen. Das Ziel ist hier die Reduzierung der lateralen Periode in den sub- $\mu\text{m}$ -Bereich. Dadurch wird der Abstand der Drähte geringer als die Diffusionslänge freier Ladungsträger und die optischen Eigenschaften somit allein bestimmt durch Rekombination in den Drähten.

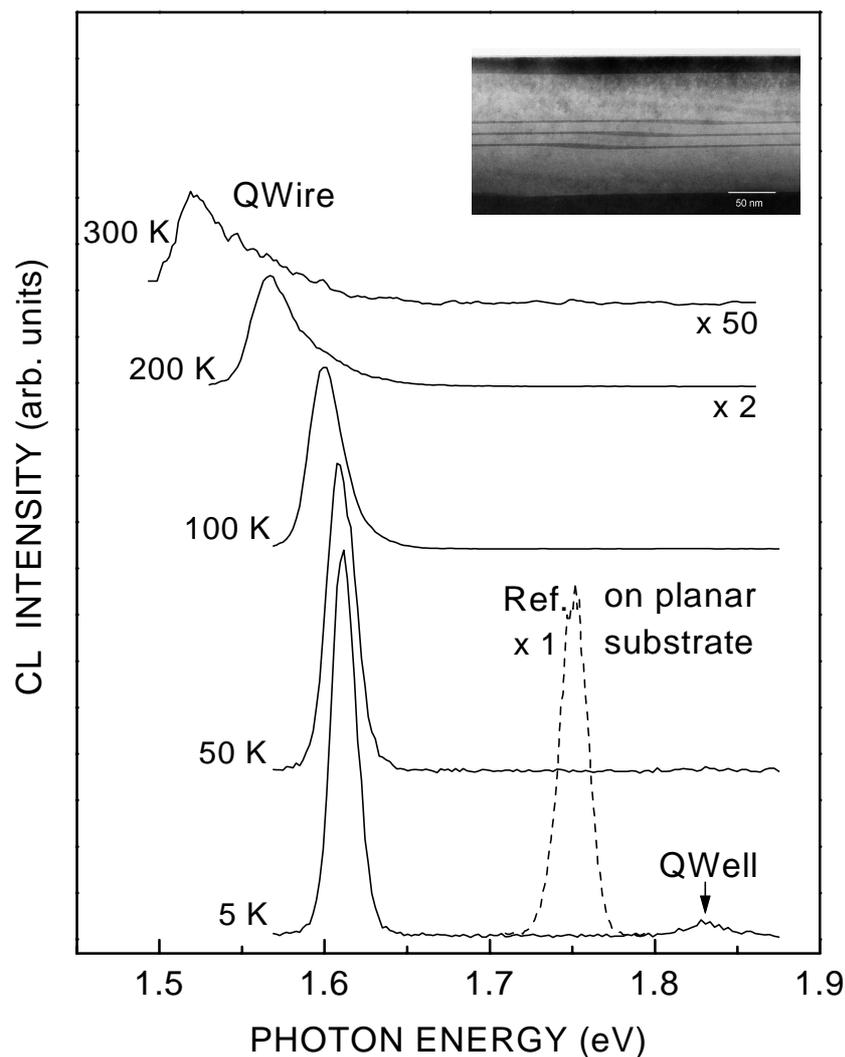


Abb. 7. CL-Spektren der dreidimensionalen Quantendraht-Anordnung zwischen 5 K und Raumtemperatur. Einsatz: TEM-Bild entlang [01-1].

Abb. 7 zeigt temperaturabhängige CL-Spektren und eine TEM-Querschnittsaufnahme der Anordnung von drei gestapelten Quantendrähten mit einer lateralen Periode von 500 nm auf einem Gitter, das mittels holographischer Lithographie und naßchemischem Ätzen hergestellt wurde. Verglichen mit einzelnen Drähten erhöht sich die Homogenität, sowie die Selektivität des Wachstums hier sogar, da auch die

Migrationslänge der Ga-Atomen größer als die laterale Periode wird. Daher ist die Diffusion der Ga-Atome direkt von der langsam- zur schnell wachsenden Mesakante möglich und führt zu homogenen Quantenwellbereichen zwischen den Drähten bei gleichzeitig erhöhter Reduzierung der Schichtdicke. Die damit erreichte hohe laterale Einschlußenergie von 220 meV (bei einer nominellen Quantenwelldicke von 3 nm) führt zu perfektem Einfang von Ladungsträgern aus den Quantenwellbereichen in die Drähte. Bei tiefen Temperaturen zeigen die CL-Spektren noch einen kleinen Beitrag der Quantenwell-Lumineszenz durch lokalisierte Ladungsträger, der bei erhöhten Temperaturen vollständig verschwindet. Bis zu Raumtemperatur wird eine sehr hohe Lumineszenzausbeute (bei schmaler Linienbreite) der Drähte, ohne thermische Re-emission von Ladungsträgern in die verbindenden Quantenwells beobachtet. Die hier entwickelten Quantendrähte zeigen somit die erforderlichen Eigenschaften für den Einsatz in Bauelementen.

### 6.3. Realisierung neuartiger, komplexer lateraler Nanostrukturen auf strukturierten GaAs (311)A-Substraten

#### 6.3.1. Dreiecksförmige Dot-Strukturen auf strukturierten GaAs (311)A-Substraten

Zur weiteren Nutzung und Erhöhung der Flexibilität des Wachstums auf strukturierten GaAs (311)A-Substraten, wurden zunächst quadratische, periodische Lochstrukturen aufgebracht. Während des Wachstums bilden sich hier dreiecksförmige Dot-Strukturen in den Bereichen zwischen den Löchern auf der ursprünglichen Substratoberfläche, deren spitzer Winkel in die  $[2\bar{3}\bar{3}]$ -Richtung zeigt (Abb. 8). Die Dot-Strukturen entstehen durch Migration von Ga-Atomen von den Seitenkanten der Löcher entlang  $[\bar{2}33]$  zur Substratoberfläche und sind durch zwei, sich frei entwickelnder  $\{111\}$ -

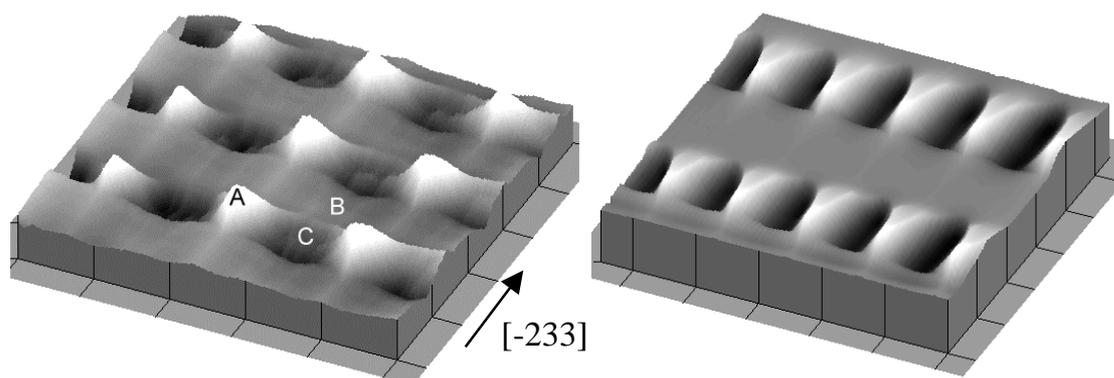


Abb. 8. AFM-Bilder der Dot-Strukturen auf quadratischen (linke Seite) und dreieckigen (rechte Seite) Lochstrukturen auf strukturierten GaAs (311)A-Substraten.

Facetten (A) begrenzt. In vergrabenen Quantenwell-Strukturen entsteht somit an der Spitze ein verdickter Bereich der, wie in CL-Messungen nachgewiesen, zu dreidimensionalem Einschluß von Ladungsträgern führt (Abb. 9). Die Bereiche zwischen den Löchern (B) sind sehr glatt. Die  $(111)$ -Seitenflächen der Löcher (C) zeigen jedoch starke Aufrauung, die zu Inhomogenität der Gesamtstruktur führt. Die

rauen Seitenkanten lassen sich vollständig unterdrücken, wenn als Ausgangsstruktur eine Anordnung dreiecksförmiger Löcher gewählt wird, deren spitzer Winkel in die  $[-233]$ -Richtung, also in Richtung der  $(111)$ -Seitenflächen zeigt (Abb. 8). Die gezielte Anpassung der Ausgangsstruktur an die Selektivität des Wachstums führt zu deutlicher Verbesserung der Homogenität der Dot-Strukturen, die sich in CL-Aufnahmen in einer klar definierten Grenze des Kontrastes zwischen den Quantenwellbereichen unterschiedlicher Dicke zeigt (Abb. 9).

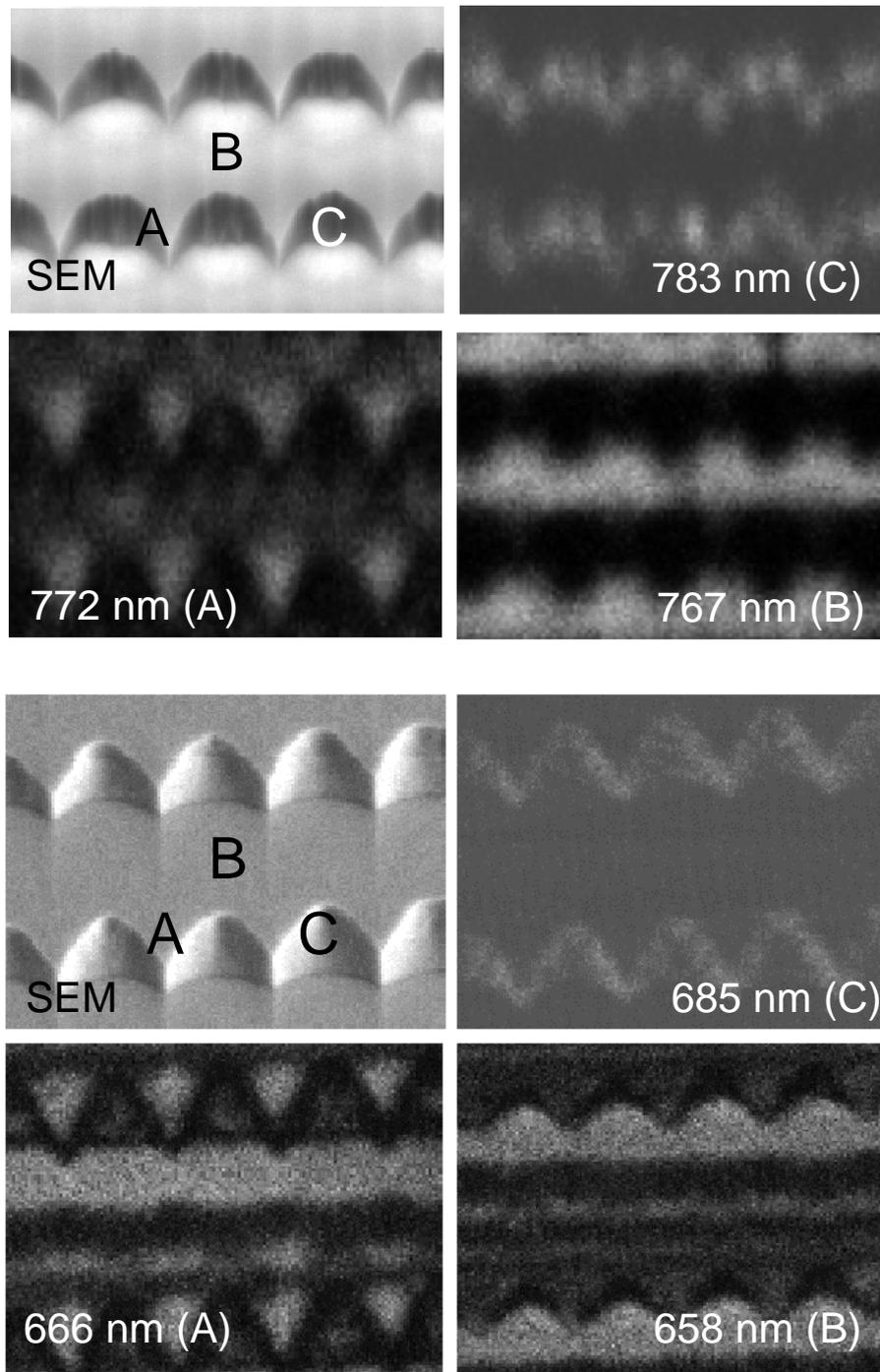


Abb. 9. SEM- und CL-Aufnahmen der Dot-Strukturen auf quadratischen (oben) und dreieckigen (unten) Lochstrukturen auf strukturierten GaAs  $(311)A$ -Substraten.

### 6.3.2. Isolierte Dot-Strukturen durch Kombination von schnell und langsam wachsenden Mesakanten

Bei Drehung des Mesastreifens von der  $[01-1]$ -Richtung in die  $[-233]$ -Richtung nimmt die Wachstumsselektivität der schnell wachsenden Mesakante ab und geht kontinuierlich in die der langsam wachsenden Mesakante entlang  $[-233]$  über. Die Wachstumsfront bricht dabei nicht in Mikrofacetten auf, sondern bleibt so glatt wie in den flachen Bereichen. Diese Eigenschaft erlaubt die kontrollierte Kombination von Mesakanten mit unterschiedlicher Wachstumsselektivität. Die Kombination einer schnell und einer langsam wachsenden Mesakante wurde an den Kanten einer zickzack-Anordnung, die um  $60^\circ$  zur  $[01-1]$ -Richtung verdreht ist, realisiert (siehe schematische Darstellung in Abb. 10 (a)). Sie führt durch die Überlagerung des Ridges der langsam wachsenden Kante mit dem konvexen Profil der schnell wachsenden Kante zu isolierten, dot-artigen Strukturen an den Spitzen. Dies wird durch die SEM-Aufnahme der Oberfläche nach Überwachsen (Abb. 10(b)) und durch das mikro-PL-Spektrum und die CL-Aufnahme eines eingebauten Quantenwells (Abb. 10 (c)) bestätigt.

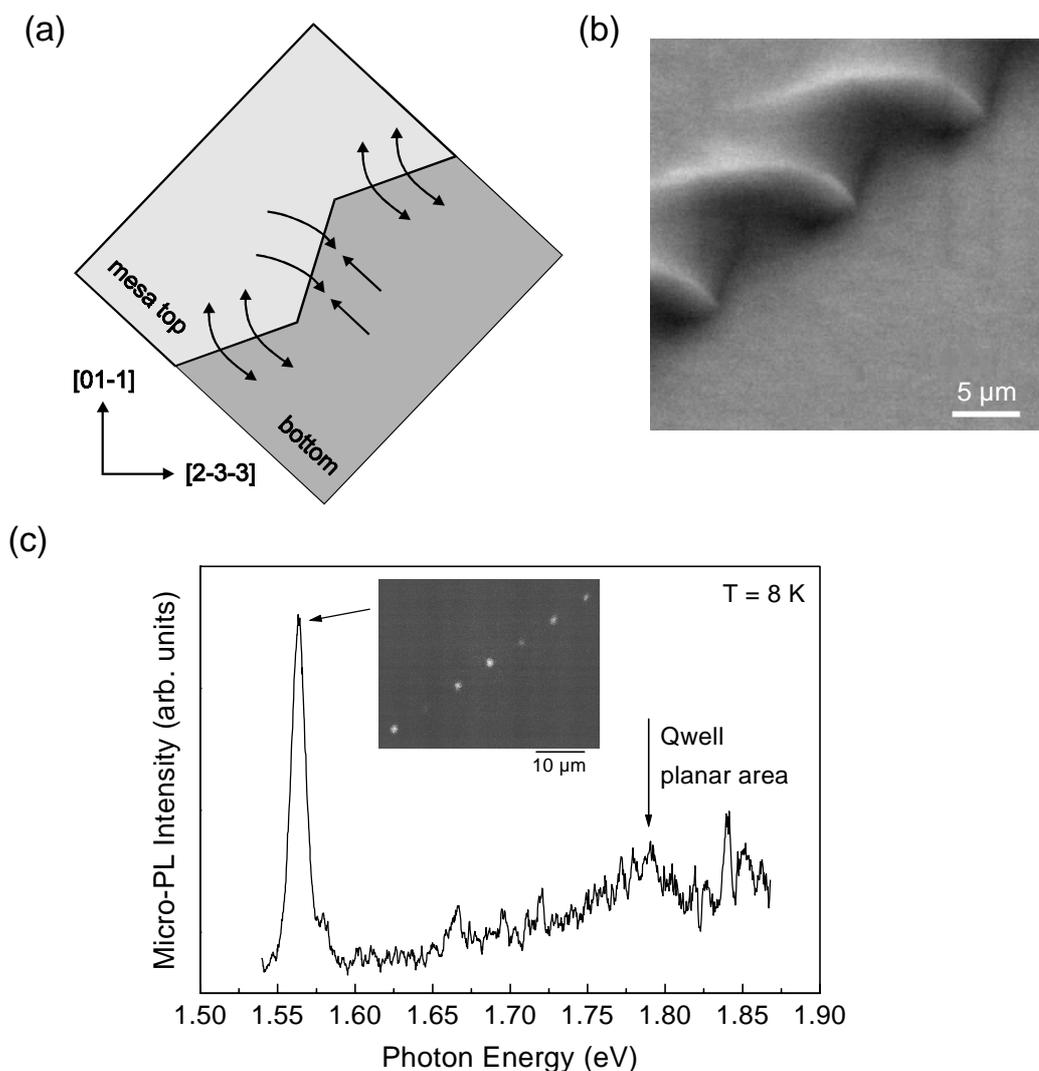


Abb. 10. (a) Schema der Kombination von schnell- und langsam wachsenden Mesakanten. (b) SEM-Aufnahme der Oberfläche. (c) Mikro-PL-Spektrum und CL-Aufnahmen der Dot-Emission.

### 6.3.3. Gekoppelte Draht-Dot-Strukturen durch Kombination zweier schnell wachsender Mesakanten

Dieselbe zick-zack-Anordnung, nun entlang  $[01-1]$  ausgerichtet, führt zur Kombination zweier schnell wachsender Mesakanten mit reduzierter Wachstumsselektivität, wie in Abb. 11 (a) angedeutet ist. Die AFM-Aufnahme in Abb. 11 (b) der Oberfläche nach Überwachsen zeigt die, symmetrisch zu  $[01-1]$  rotierten, schnell wachsenden Kanten mit glatter Oberflächenmorphologie. Gekoppelte Draht-Dot-Strukturen entstehen durch Verbindung der Quantendrähte mit erniedrigter Selektivität (d.h. höherer Energielücke) entlang den Seitenkanten mit den Dot-Strukturen in den Ecken, in denen die Selektivität gegenüber der der Drähte erhöht ist (entsprechend einer kleineren Energielücke). Abb. 11 (c) zeigt das zugehörige CL-Spektrum und die CL-Aufnahmen im Einsatz. Wichtig ist hier, daß durch die laterale Migration der Ga-Atome keine zusätzlichen Energiebarrieren zwischen den Drähten und den Dots gebildet werden. Dadurch ist ungehinderte Ladungsträgerdiffusion von den Drähten in die Dots gewährleistet. Dies wird durch die Ausdehnung des Kontrastes der Dot-Emission in den CL-Aufnahmen in die Drahtbereiche hinein deutlich, was insbesondere bei erhöhten Temperaturen deutlich sichtbar wird.

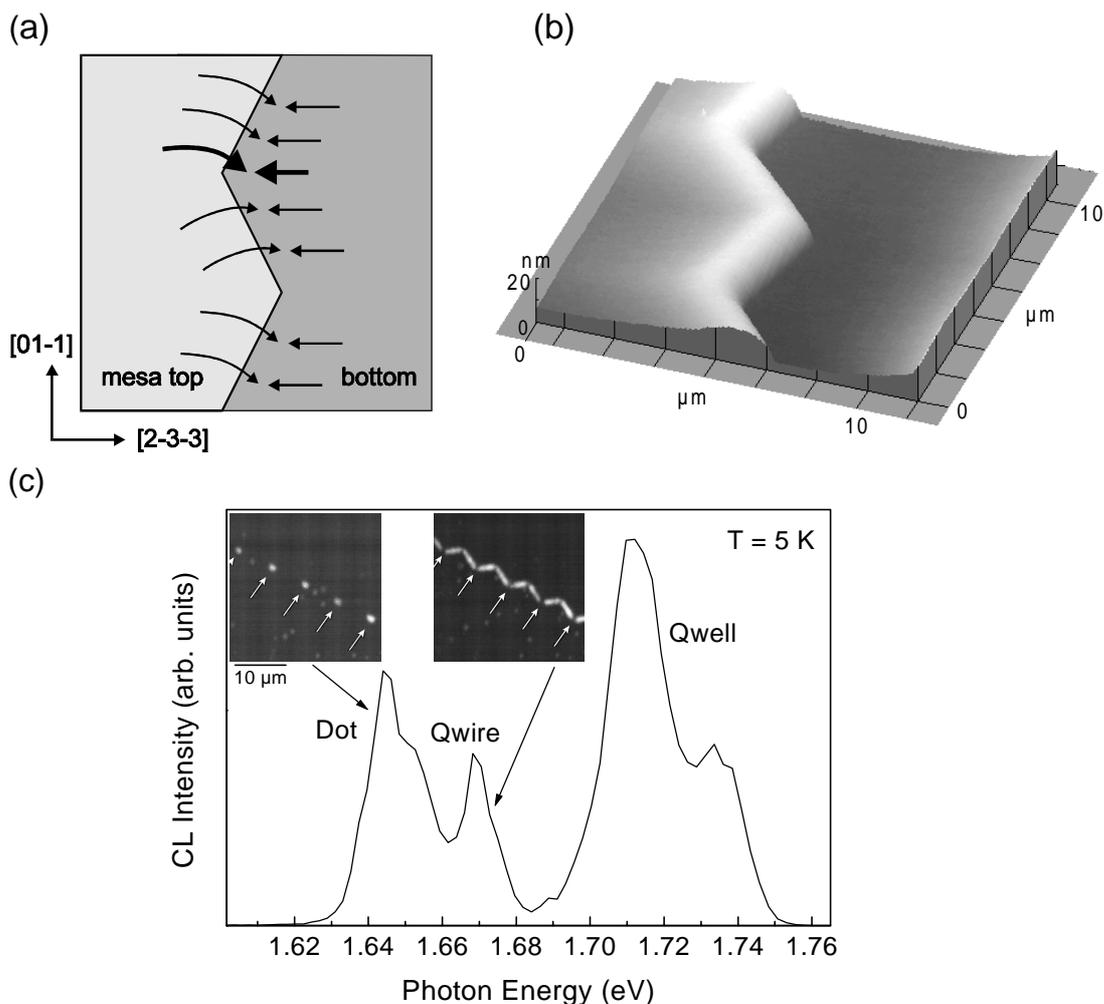


Abb. 11. (a) Schema der Kombination zweier schnell wachsender Mesakanten. (b) AFM-Aufnahme der Oberfläche. (c) CL-Spektrum und CL-Aufnahmen der Draht- und Dot-Emission.

### 6.3.4. Isolierte Dot-Strukturen in den Ecken zweier schnell wachsender Mesakannten

Eine dichte Matrix isolierter dot-artiger Strukturen wurde in den Ecken von dreiecksförmigen Löchern mit schnell wachsenden Seitenkanten realisiert. Die Seitenkanten der Löcher, die mittels Elektronenstrahlolithographie und naßchemischem Ätzen (Tiefe 40 nm) präpariert wurden haben eine Seitenlänge von 500 nm. Die AFM-Aufnahme in Abb. 12 (a) zeigt die Oberfläche der überwachsenen Struktur. Das CL-Spektrum (Abb. 12 (b) zeigt nur zwei Peaks, von den Quantenwell-Bereichen zwischen den Löchern und von den Dots in den schnell wachsenden Ecken, wie durch die entsprechenden CL-Aufnahmen in Abb. 12 (c,d) bestätigt wird. Ähnlich wie bei lateralen Quantendrähten auf sub- $\mu\text{m}$ -Gittern erhöht sich auch hier die Homogenität

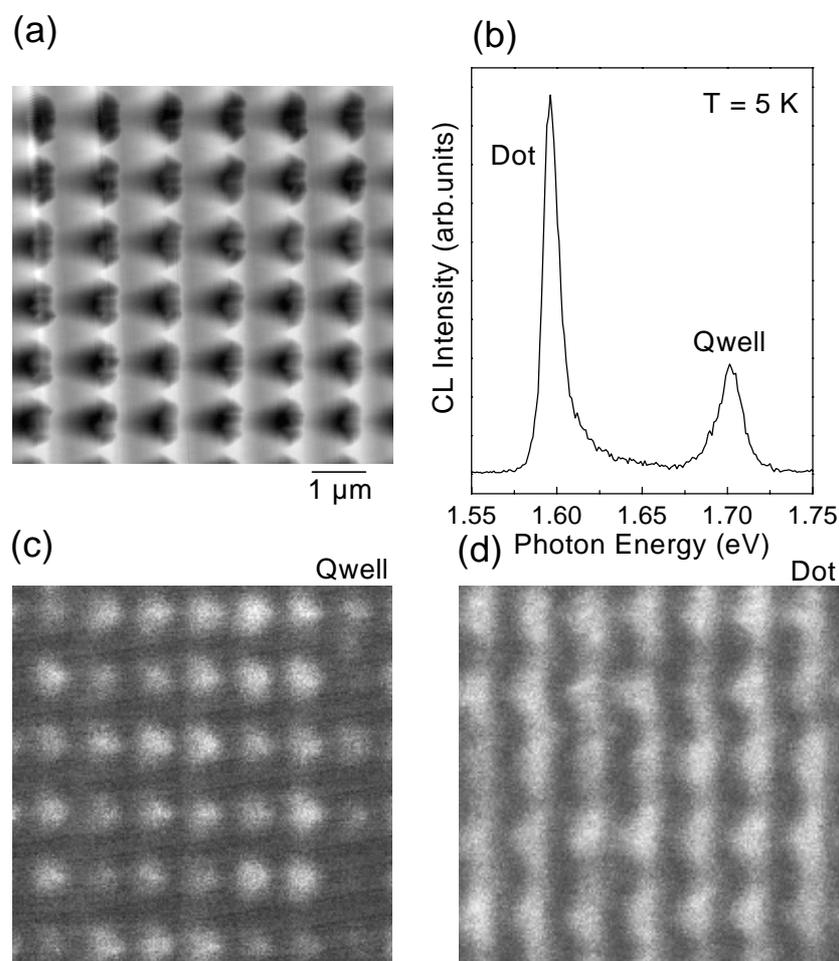


Abb. 12. (a) AFM-Aufnahme der Oberfläche. (b) CL-Spektrum. (c,d) CL-Aufnahmen der Quantenwell- und Dot-Emission. der Struktur bei Verkleinerung der Strukturgrößen.

## 6.4. Wasserstoffunterstützte MBE auf hoch-indizierten GaAs-Substraten

### 6.4.1. Einfluß von atomarem Wasserstoff auf die Morphologie von GaAs auf hoch-indizierten Substraten

Mit dem Ziel der weiteren Erhöhung der Flexibilität des Wachstums auf hoch-indizierten GaAs-Substraten und der Erzeugung neuartiger selbstorganisierter Nanostrukturen wurde der Einfluß von atomarem Wasserstoff auf das Wachstum von GaAs auf hoch-indizierten Substraten untersucht. Der atomare Wasserstoff wurde dabei während des Wachstums durch Aufbrechen von molekularem Wasserstoff an einem etwa 1800 °C heißen Filament angeboten. Abb. 13 zeigt die AFM-Aufnahmen von 100 nm dicken GaAs-Schichten auf GaAs (331), (210), und (311)-Substraten, die mittels konventioneller MBE - und mittels wasserstoffunterstützter MBE gewachsen wurden. Zum Vergleich sind auch die entsprechenden [100]-orientierten Schichten als Referenz gezeigt.

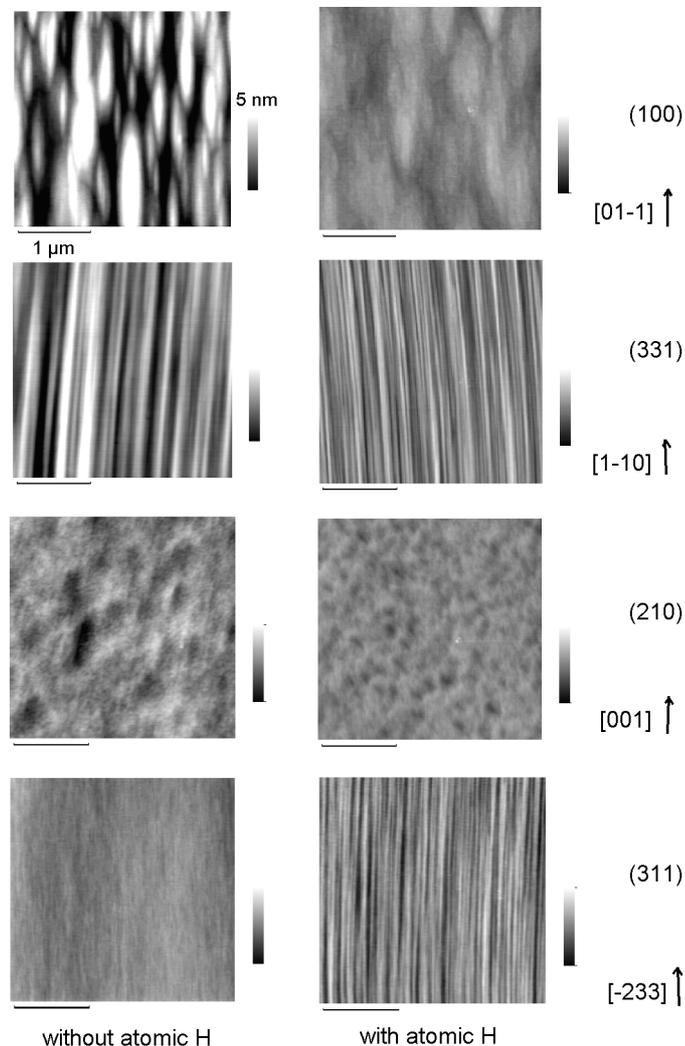


Abb. 13. AFM-Aufnahmen der Oberflächenmorphologie von 100 nm dicken GaAs-Schichten auf GaAs (100), (331), (210) und (311)-Substraten, die sowohl mit konventioneller MBE (links), als auch unter Einfluß von atomarem Wasserstoff (rechts) gewachsen wurden. Die Längenskala ist 1 μm und die gesamte Höhendifferenz ist 5 nm in allen Aufnahmen.

Auf den (100)-Substraten ändert sich die Oberflächenmorphologie qualitativ nicht. Es treten Wachstumsinseln auf, die sich über einige  $\mu\text{m}$  erstrecken und entlang der [01-1] Richtung ausgedehnt sind. In Übereinstimmung mit Berichten in der Literatur wird die Oberfläche unter Einfluß von atomarem Wasserstoff im Mittel etwas flacher. Im Gegensatz dazu erzeugt atomarer Wasserstoff auf den hoch-indizierten Oberflächen eine deutliche Tendenz zur Stufenaufhäufung. Es entstehen eindimensionale Makrostufensysteme mit lateralen Periodizitäten von einigen 10 nm. Die hier untersuchten Substrate wurden als die drei Repräsentanten, die jeweils aus gleichen Teilen der niedrig indizierten (100), (111), oder (110)-Oberflächen zusammengesetzt sind, ausgewählt. Auf der (331)-Oberfläche bewirkt atomarer Wasserstoff eine deutliche Verstärkung der Stufenaufhäufung, die gegenüber der, in konventioneller MBE auftretenden deutlich homogener ist. Mit Erhöhung der Substrattemperatur können hier Stufensysteme mit lateralen Perioden von 250 nm und Höhen bis zu 10 nm generiert werden, wobei sich die Stufenhöhe unter Einfluß von atomarem Wasserstoff verdoppelt. Das Verhalten auf (210)-Oberflächen ist ähnlich, wird jedoch durch eine stärkere Oberflächenrauigkeit überdeckt. Auf (311)A-Substraten ändert atomarer Wasserstoff die Morphologie sogar qualitativ. Die auf der mesoskopischen Längenskala glatte Oberfläche in konventioneller MBE bildet unter Einwirkung von atomarem Wasserstoff sehr homogene, eindimensionale Stufensysteme mit einer lateralen Periode von 40 nm und 2-3 nm Höhe.

Es ist heute weitgehend akzeptiert, daß flache Oberflächen erhalten bleiben, wenn sich Atome während des Wachstums hauptsächlich an Aufwärtsstufen anlagern, während Stufenaufhäufung dann auftritt, wenn der Einbau an Abwärtsstufen wahrscheinlicher ist. Offensichtlich ändert atomarer Wasserstoff also das Einbauverhalten von Ga-Atomen dahingehend, daß der Einbau an Abwärtsstufen begünstigt wird. Aufgrund der hohen Stufendichte hoch-indizierter Oberflächen wird demnach dort durch atomaren Wasserstoff die Tendenz zur Stufenaufhäufung besonders verstärkt oder, wie auf (311)A-Oberflächen, erst bewirkt. Leider können aus morphologischen Untersuchungen alleine keine weiteren Schlüsse auf den zugrundeliegenden Mechanismus, d.h. den Einfluß von atomarem Wasserstoff auf die Oberflächenchemie und die atomaren Bindungsverhältnisse gewonnen werden.

#### 6.4.2. Modulationsdotierte Quantendrähte auf GaAs (331)A-Substraten

Auf GaAs (331)A-Substraten wurde die Erzeugung selbstorganisierter Stufensysteme in wasserstoffunterstützter MBE zur direkten Herstellung von Si- (n-typ) modulationsdotierten GaAs/(AlGa)As-Quantendrähten genutzt, die eine starke Anisotropie der elektrischen Leitfähigkeit aufweisen. Die Anisotropie der elektrischen Leitfähigkeit parallel und senkrecht zu den Stufenkanten nimmt mit der Stufenhöhe zu und erreicht Werte über 10 für 6 nm hohe Stufen bei einer gemittelten Ladungsträgerkonzentration von  $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  (Abb. 14).

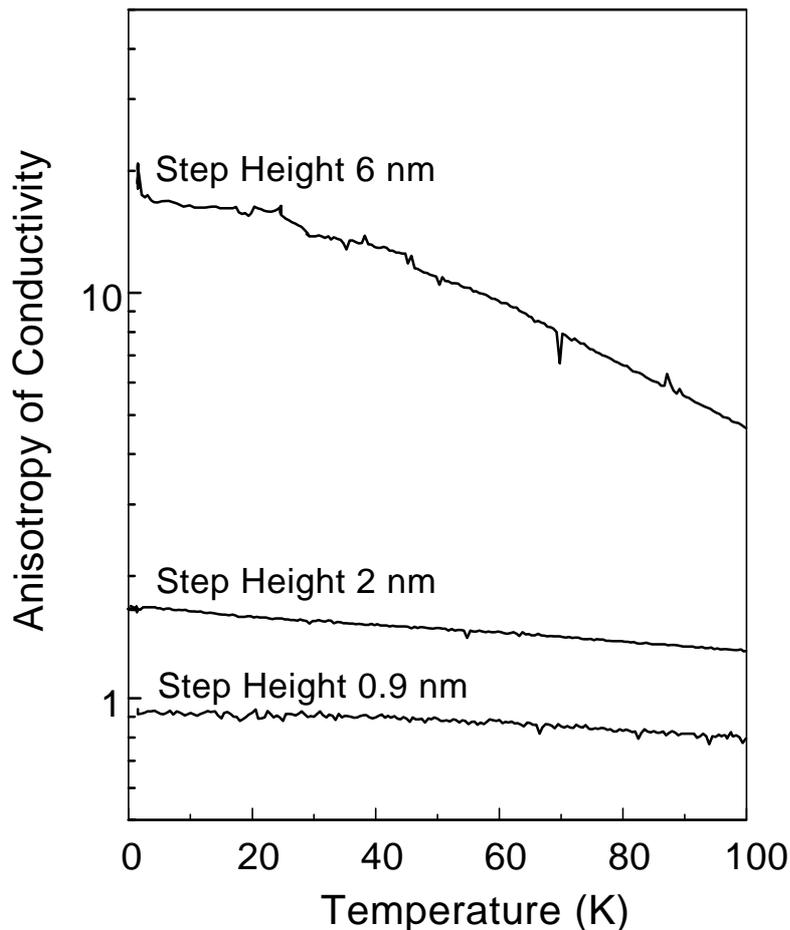


Abb. 14. Anisotropie der elektrischen Leitfähigkeit in modulationsdotierten Quantendrähten auf GaAs (331)A-Substraten.

#### 6.4.3. Quantenpunkte durch selbstorganisierte Stufensysteme auf strukturierten GaAs (311)A-Substraten

In wasserstoffunterstützter MBE auf GaAs (311)A-Substraten verlaufen die natürlichen Stufensysteme entlang der  $[-233]$ -Richtung, also senkrecht zu den Quantendrähten entlang  $[01-1]$  auf strukturierten Substraten. Die Stufensysteme laufen ohne Versatz über die konvex gekrümmte schnell wachsende Mesakante und formen somit eine dichte Kette von Quantenpunkten durch periodische Dickenmodulation der Quantendrähte entlang der Mesakante (Abb. 15). Der dreidimensionale quantenmechanische Einschluß von Ladungsträgern zeigt sich direkt in der Aufspaltung der mikro-PL-Spektren in eine Serie ultrascharfer Peaks. Für die Quantenwellbereiche nahe der Mesakante fluktuiert die energetische Verteilung der Peaks statistisch über die Einhüllende des Spektrums wegen der statistischen Größenverteilung der Lokalisierungszentren entlang der natürlichen Stufensysteme. Die PL der Quantenpunkte entlang der Mesakante zeigt dagegen eine starke energetische Einengung des spektralen Bereichs. Die Spektren werden durch einen

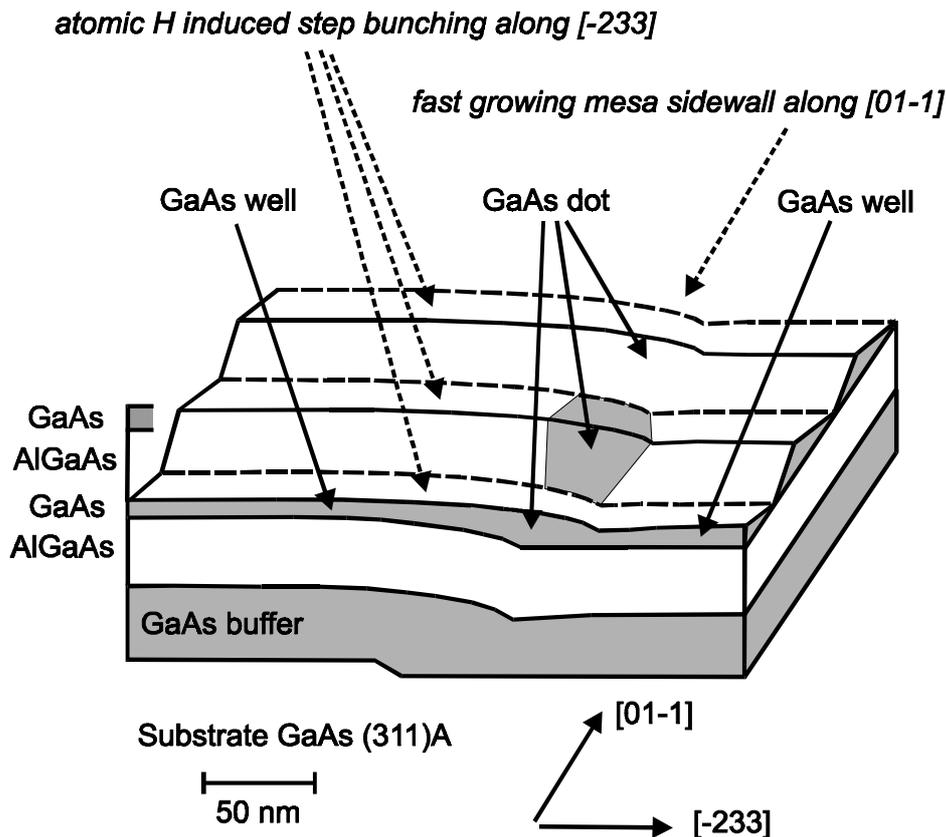


Abb. 15. Schematische Darstellung der Bildung homogener Quantenpunkt-Anordnungen durch Kombination natürlicher Stufenbildung in wasserstoffunterstützter MBE mit dem Wachstum auf strukturierten GaAs (311)A-Substraten.

scharfen Peak im Zentrum der Einhüllenden mit einer Linienbreite unterhalb der spektralen Auflösungsgrenze von  $60 \mu\text{eV}$  dominiert. Die somit erreichte hohe Homogenität der Quantenpunkte (die statistischen Fluktuationen entlang der natürlichen Stufensysteme sind durch die Drahtbildung auf strukturierten Substraten - und die statistischen Fluktuationen entlang der Drähte durch die periodische Dickenmodulation zur Bildung der Quantenpunkte aufgehoben) zeigt sich deutlich in der unverändert scharfen Linienform, wenn der Durchmesser der optischen Probfäche von  $2$  auf  $16 \mu\text{m}$  erhöht wird und sich somit die Anzahl der Quantenpunkte von einigen  $10$  auf einige  $100$  vergrößert (Abb. 16). Die Kombination von natürlicher Stufenbildung in wasserstoffunterstützter MBE mit dem Wachstum auf strukturierten Substraten ermöglicht also die Herstellung von Quantenpunkt-Anordnungen mit sehr großer Homogenität über Bereiche, die groß genug für die weitere Strukturierung von Bauelementen sind.

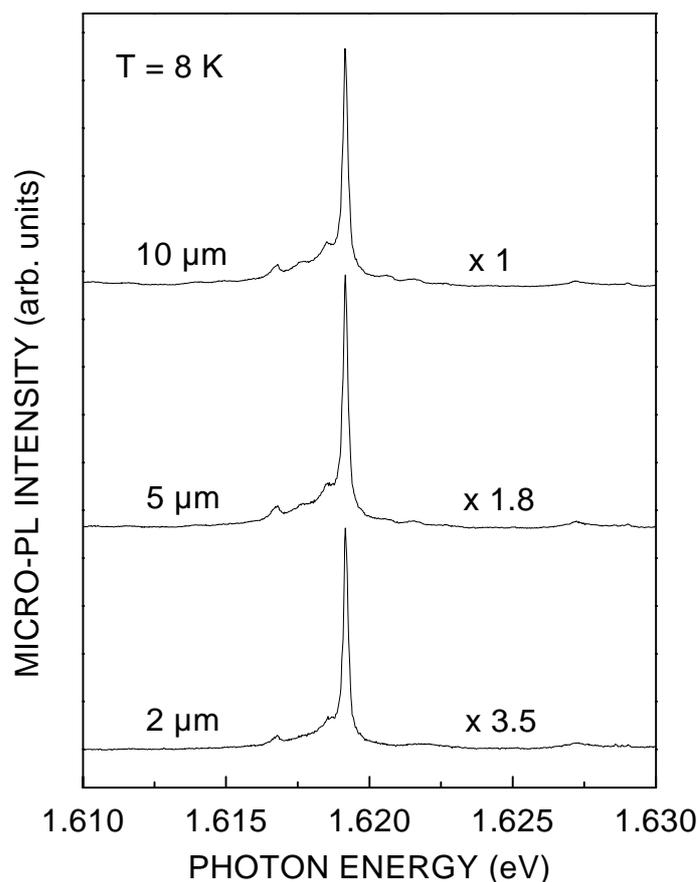


Abb. 16 Mikro-PL-Spektren der Quantenpunkt-Anordnung entlang der schnell wachsenden Mesakante in Abhängigkeit des Durchmessers der optischen Probfläche.

## 7. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse begründet sich vor allem auf die quasi-Planarität der Quantendrähte und Quantenpunkte, die große Flexibilität zur Erzeugung neuartiger funktionaler lateraler Nanostrukturen, die verbesserte Homogenität und erhöhten lateralen Einschlußenergien bei Strukturverkleinerung, die Erzeugung von Quantenpunkt-Anordnungen mit minimierten Größenverteilungen und natürlich die wohldefinierte Anordnung all dieser Strukturen auf der Substratoberfläche. Damit sind diese lateralen Nanostrukturen ideal kompatibel mit dem Design und der Herstellung von herkömmlichen Bauelementen, und bieten ein großes Potential für die Realisierung neuartiger Bauelementkonzepte mit erhöhter und/oder neuartiger Funktionalität.

Trotz der Fortschritte auf dem Gebiet der epitaktischen Herstellung von Quantendrähten und Quantenpunkten bei anderen Stellen, insbesondere der Kombination mit in-situ-Ätzen (siehe Projektpartner), bieten die hier entwickelten lateralen Nanostrukturen hinsichtlich Qualität, Flexibilität und Kontrolle der strukturellen und elektronischen Eigenschaften eine echte Alternative zu den dort überwiegend untersuchten verspannungsinduzierten Quantenpunkten und V-Graben-Quantendrähten und Quantenpunkten auf konventionellen GaAs (100)-Substraten.

## 8. Auszug der wichtigsten Veröffentlichungen

- [1] R. Nötzel, J. Menniger, M. Ramsteiner, A. Ruiz, H.P. Schönherr, and K.H. Ploog, Selectivity of growth on patterned GaAs (311)A substrates, *Appl. Phys. Lett.* 68, 1132 (1996).
- [2] R. Nötzel, M. Ramsteiner, J. Menniger, A. Trampert, H.P. Schönherr, L. Däweritz, and K.H. Ploog, Patterned growth on high-index GaAs (n11) substrates: Applications to sidewall quantum wires, *J. Appl. Phys.* 80, 4108 (1996).
- [3] Z.C. Niu, R. Nötzel, H.-P. Schönherr, J. Fricke, L. Däweritz, and K.H. Ploog, Formation of nanostructured surfaces during molecular beam epitaxy on square shaped hole and mesa patterns on GaAs (311)A substrates, *J. Cryst. Growth* 187, 333 (1998).
- [4] H.P. Schönherr, J. Fricke, Z.C. Niu, K.J. Friedland, R. Nötzel, and K.H. Ploog, Uniform multiautomic step arrays formed by atomic hydrogen assisted molecular beam epitaxy on GaAs (331) substrates, *Appl. Phys. Lett.* 72, 566 (1998).
- [5] R. Nötzel, Z.C. Niu, M. Ramsteiner, H.P. Schönherr, A. Trampert, L. Däweritz, and K.H. Ploog, Uniform quantum dot arrays formed by natural self-faceting on patterned substrates, *Nature* 392, 56 (1998).
- [6] R. Nötzel, U. Jahn, Z.C. Niu, A. Trampert, J. Fricke, H.P. Schönherr, T. Kurth, D. Heitmann, L. Däweritz, and K.H. Ploog, Device quality submicron arrays of stacked sidewall quantum wires on patterned GaAs (311)A substrates, *Appl. Phys. Lett.* 72, 2002 (1998).
- [8] J. Fricke, R. Nötzel, U. Jahn, H.P. Schönherr, L. Däweritz, and K.H. Ploog, Patterned growth on GaAs (311)A substrates: Dependence on mesa misalignment and sidewall slope and its application to coupled wire-dot arrays, *J. Appl. Phys.* 85, 3576 (1999).
- [9] P.V. Santos, R. Nötzel, and K.H. Ploog, Polarization anisotropy in quasiplanar sidewall quantum wires on patterned GaAs (311)A substrates, *J. Appl. Phys.* 85, 8228 (1999).
- [10] K.J. Friedland, H.P. Schönherr, R. Nötzel, and K.H. Ploog, Selective control of electrons in quantum wires formed by highly uniform multiautomic step arrays on GaAs (331) substrates, *Phys. Rev. Lett.* 83, 156 (1999).
- [11] U. Jahn, R. Nötzel, J. Ringling, H.P. Schönherr, H.T. Grahn, and K.H. Ploog, Exciton capture and losses in a stacked submicron array of sidewall quantum wires on patterned GaAs (311)A substrates, *Phys. Rev. B* 60, 11038 (1999).