

<b>ZE:</b> Fraunhofer Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut (HHI)	<b>Förderkennzeichen:</b> 13N10448
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> KMU-innovativ – Verbundprojekt: Langwellige BTJ-VCSEL auf MBE- und MOVPE-Basis (VCSEL) – Teilvorhaben: MOVPE-Entwicklung von BTJ-VCSEL-Strukturen (Teilprojekt B)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2010 - 30.06.2012	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2010 - 30.06.2012 (Abschlussbericht)	
<b>Projektleiter:</b> Dr. Konstantin Pötschke	
<b>Verfasser Bericht:</b> Dr. Konstantin Pötschke	

## Inhalt

<b>KURZE DARSTELLUNG - ZIELSETZUNG UND RAHMENBEDINGUNGEN.....</b>	<b>3</b>
<b>1 AUFGABENSTELLUNGEN/ZIELE .....</b>	<b>3</b>
<b>2 VORAUSSETZUNGEN.....</b>	<b>3</b>
<b>3 PLANUNG UND ABLAUF.....</b>	<b>4</b>
<b>4 WISSENSCHAFTLICH/TECHNISCHER STAND .....</b>	<b>4</b>
<b>5 ZUSAMMENARBEIT.....</b>	<b>5</b>
<b>EINGEHENDE DARSTELLUNG - ERGEBNISSE UND VERWERTBARKEIT.....</b>	<b>6</b>
<b>1 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ERGEBNISSE .....</b>	<b>6</b>
1.1 MOVPE-HERSTELLUNG UND OPTIMIERUNG VON HALBLEITER-DBR SPIEGELN (WP 1) .....	6
1.1.1 Wahl des Trägergases.....	6
1.1.2 Wahl der Materialkombination .....	6
1.2 EPITAXIE TUNNELKONTAKTSTRUKTUR (WP4) .....	9
1.2.1 Hochdotierung von InGa(Al)As mit konventionellen Dotierstoffen.....	9
1.2.2 Wachstum von n/p++/n++-InGa(Al)As Tunnelstrukturen .....	10
1.2.3 Hochdotierung mit Kohlenstoff für p++-InGaAs(P) .....	12
1.3 MOVPE-OPTIMIERUNG TUNNELKONTAKTÜBERWACHUNG (WP5).....	13
1.4 EPITAKTISCHE HERSTELLUNG KOMPLETTER VCSEL-SCHICHTSTRUKTUREN (WP7) .....	15
<b>2 WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES .....</b>	<b>18</b>
<b>3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT.....</b>	<b>18</b>
<b>4 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN/VERWERTBARKEIT .....</b>	<b>18</b>
<b>5 FORTSCHRITT DES GEBIETES DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN.....</b>	<b>19</b>
<b>6 VERÖFFENTLICHUNGEN .....</b>	<b>19</b>
<b>ERFOLGSKONTROLLBERICHT .....</b>	<b>FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>
<b>1 BEITRAG ZU FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN .....</b>	<b>FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>
<b>2 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ERGEBNISSE .....</b>	<b>FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>
<b>3 FORTSCHREIBUNG DES VERWERTUNGSPLANS .....</b>	<b>FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>
<b>4 ARBEITEN DIE ZU KEINER LÖSUNG GEFÜHRT HABEN .....</b>	<b>FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>
<b>5 PRÄSENTATIONSMÖGLICHKEITEN.....</b>	<b>FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>
<b>6 EINHALTUNG DER KOSTEN- UND ZEITPLANUNG .....</b>	<b>FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>

# Kurze Darstellung - Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Das Verbundprojekt „Langwellige BTJ-VCSEL auf MBE- und MOVPE-Basis (VCSEL)“ ist ein durch das BMBF gefördertes Vorhaben im Rahmen der Initiative „KMU-innovativ“. Die Projektgruppe bestand aus der Vertilas GmbH und dem Fraunhofer Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut (HHI).

## 1 Aufgabenstellungen/Ziele

Die Aufgabe und Ziele des Projektes „VCSEL“ lagen in der Realisierung von hinsichtlich Performance und Ausbeute verbesserter langwelliger VCSEL (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*) für die breitbandige optische Kommunikation. Gleichzeitig sollte der nutzbare Wellenlängenbereich auf den marktrelevanten Bereich 1.27  $\mu\text{m}$  bis 1.33  $\mu\text{m}$  erweitert (s. Verbund-Beschreibung VCSEL) und ein Transfer der VCSEL-Prozesse vom bislang verwendeten Herstellungsverfahren *Molecular Beam Epitaxy* (MBE) auf *Metalorganic Vapour Phase Epitaxie* (MOVPE) untersucht werden. Die Ziele des Teilvorhabens B: „MOVPE-Entwicklung von BTL-VCSEL-Strukturen“ sind durch die übergeordneten Ziele des Verbund-Projekts gegeben und tragen zu deren Erreichung bei.

Im Einzelnen handelte es sich dabei um die Optimierung des Wachstums Halbleiter basierter *distributed Bragg reflector* (DBR)-Strukturen, die Entwicklung von Wachstumsparametern für höchste n- und p-Dotierungen für die Herstellung von Tunnelkontakten, die Herstellung und Charakterisierung von Tunnelkontaktteststrukturen, sowie das (im Prozessverlauf) abschließende Überwachen für die lokalisierte Strominjektion. Die Abfolge der Arbeiten mündete in komplett MOVPE gewachsenen Schichtstrukturen für Musterbauelemente.

## 2 Voraussetzungen

Das HHI ist eine weltweit führende Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der photonischen Komponenten (u.a. Laser, Detektoren, Modulatoren) für den Einsatz in der optischen Kommunikationstechnik. Die technologische Basis ist die Indiumphosphid (InP) Halbleitertechnologie. Die Materialherstellung, ein Schlüsselprozess für die Herstellung von InP-Halbleiterkomponenten, basiert dabei auf der MOVPE, die für das beantragte Teilvorhaben von zentraler Bedeutung ist. Das HHI besitzt darin eine umfangreiche und mehr als 25-jährige, weltweit anerkannte Expertise. Es stehen zwei Anlagen des Typs AIX 200 (geeignet für 1x2" Einzelwafer), eine Anlage des Typs AIX 200/4 (geeignet für bis zu 3x2" Wachstum und 1x3" Einzelwafer) und eine, während der Laufzeit des Projektes in Betrieb genommene, Multiwaferanlage des Typs AIX 2600 für das gleichzeitige Wachstum auf bis zu 8x2"/3" Wafers zur Verfügung.

Es können Schichtstrukturen hergestellt werden, die sowohl die Halbleiterverbindungen InGaAsP als auch InGaAlAs und Mischformen beinhalten. Auf Basis dieser Materialien sind bereits eine Vielzahl von zum Teil sehr komplexen Bauelementstrukturen realisiert worden. Parametersätze für verspannte und unverspannte Quantumwell (QW)-Schichten, wie sie im Vorhaben als aktive Bereiche in die zu entwickelnden *Buried Tunnel Junction* (BTJ) VCSEL Schichtenfolgen eingesetzt werden sollten, gehören zum „Standardrepertoire“.

Beide Partner haben langjährige Erfahrung in der Erforschung, Untersuchung und Herstellung von Halbleiterlasern. VERTILAS entwickelt, produziert und vertreibt langwellige VCSEL in den Marktsegmenten optische Kommunikation und laserbasierte (Near Infrared) Gasanalyse. Neben den Fähigkeiten zur Entwicklung und Produktion von Lasern verfügt VERTILAS ebenfalls über weitreichende Kenntnisse und Verfahren zum Test, Aufbau, Gehäusetechnik und Charakterisierung von VCSELn.

### 3 Planung und Ablauf

Das Projekt wurde im Zeitraum von Januar 2010 bis Juni 2012 durchgeführt. Die ursprünglich geplante Laufzeit von 2 Jahren wurde auf Grund verzögerten Projektbeginns, verzögerter Anlageninbetriebnahme und, daraus resultierend, verspätet zur Verfügung stehender Ressourcen des HHI und apparativer Schwierigkeiten des Projektpartners in Absprache mit der Projektbetreuerin, dem Projektträger und den Projektpartnern um ein halbes Jahr verlängert.

Der Netzplan des VCSEL-Projektes gliederte sich in die neun nachfolgend dargestellte Arbeitspakete (verantwortlicher Partner in Klammern):

- AP-1 MOVPE-Herstellung und Optimierung Halbleiter-DBR (HHI)
- AP-2 Dielektrische Spiegel als alternatives Konzept für Top-Spiegel (VERT)
- AP-3 Modellierung & Charakterisierung von Tunnelkontakten (VERT)
- AP-4 Epitaxie Tunnelkontaktstruktur (HHI)
- AP-5 MOVPE-Optimierung Tunnelkontaktüberwachung (HHI)
- AP-6 "Short cavity VCSEL DESIGN (VERT)
- AP-7 Epitaktische Herstellung kompletter VCSEL-Schichtstrukturen (HHI)
- AP-8 Prozessierung & Charakterisierung von VCSEL- Bauelementen (VERT)
- AP-9 Transfer MOVPE-Prozess (HHI)

### 4 Wissenschaftlich/technischer Stand

Der Stand der Wissenschaft und Technik, an dem zu Projektbeginn angeknüpft wurde, ist der nachfolgend aufgelisteten Zusammenstellung der für unser Vorhaben relevanten Fachliteratur zu entnehmen:

- [1] W. Hofmann, M.C. Amann, Long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers for high-speed applications and sensing, IET Optoelectronics, The Institution of Engineering and Technology 2008, p. 1-9
- [2] [www.beamexpress.com](http://www.beamexpress.com)
- [3] [www.raycan.com](http://www.raycan.com)
- [4] N. Grote, *The III-V-Materials for Infra-Red Devices*, in: *Materials for Optoelectronics* (ed. Maurice Quillec), Kluwer Academic Publ. 1996, ISBN 0-7923-9665-0, p. 153 ff
- [5] G. Böhm, M. Ortsiefer, R. Shau, F. Köhler, R. Meyer and M.-C. Amann: *AlGaAlAs/InP -epitaxy for long wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers*, J. Crystal Growth 227-228, 319 (2001).
- [6] K. Tatenno, Y. Kohama and C. Amano: *Carbon doping and etching effects of CBr<sub>4</sub> during MOVPE deposition of GaAs and AlAs*, J. Crystal Growth 172, 5 (1997).
- [7] N. Kuroda, A. Fujihara, Y. Ikenaga, H. Ishizaki and S. Tanaka: *Characterization of InP/InGaAs heterojunction bipolar transistors with carbon-doped base layers grown by MOVPE and MBE*, Jpn. J. Appl. Phys. 44, 6412 (2005).

- [8] H. Sugiura, M. Mitsuhashi and S. Kondo: *Characterization of heavily carbon-doped InGaAsP layers grown by chemical beam epitaxy using tetrabromide*, Appl. Phys. Lett. 73, 2482 (1998).
- [9] N.I. Buchan, T.F. Kuech, G. Scilla and F. Cardone: *Carbon incorporation in metalorganic vapor phase epitaxy grown GaAs using  $CH_3X_{4-y}$ , TMG and AsH<sub>3</sub>*, J. Crystal Growth 110, 405 (1991)
- [10] D. Keiper, R. Westphalen and G. Landgren: *Comparison of carbon doping of InGaAs and GaAs by CBr<sub>4</sub> using hydrogen or nitrogen gas in LP-MOVPE*, J. Crystal Growth 197, 25 (1999)
- [11] H. Hardtdegen, T. Raafat, M. Hollfelder and C. Ungermanns: *A new method for controlled carbon doping in LP-MOVPE of GaAs using TMAs and mixtures of TMGa/TEGa*, J. Crystal Growth 156, 333 (1995)

## 5 Zusammenarbeit

Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen fand im Rahmen dieses Projektes nicht statt.

# Eingehende Darstellung - Ergebnisse und Verwertbarkeit

## 1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Nachfolgend werden die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete mit HHI-Beteiligung beschrieben.

### 1.1 WP 1 – MOVPE-Herstellung und Optimierung von Halbleiter-DBR

Für die im Vorhaben verfolgte BTJ-VCSEL-Struktur wird bauartbedingt nur ein n-dotierter DBR-Halbleiterspiegel benötigt. Auf InP-Basis können solche Spiegelstrukturen prinzipiell aus den alternativen Schichtkombinationen InGaAlAs/InAlAs, InGaAlAs/InP, InGaAsP/InP oder InGaAsP/InAlAs hergestellt werden. Beim Projektpartner VERTILAS wird bisher ausschließlich ersteres System eingesetzt, da die dort verwendete Molekularstrahlepitaxie nicht für das Wachstum Phosphor-haltiger Materialien geeignet ist. Mit dem MOVPE-Verfahren können dagegen sowohl Aluminium- als auch Phosphor-haltige Schichten problemlos hergestellt und innerhalb derselben Schichtstruktur kombiniert werden, so dass prinzipiell alle zuvor genannten Materialkombinationen in Betracht gezogen werden können.

#### 1.1.1 Wahl der Materialkombination

Halbleiter-DBR Spiegel für den 1300 nm und 1550 nm Bereich wurden unter Verwendung von  $N_2$  als Reaktorgas (siehe dazu Abschnitt 1.1.2) mit MOVPE hergestellt. In Abbildung 2 ist im Insert exemplarisch ein Reflektivitätsspektrum einer für 1300 nm ausgelegten Struktur dargestellt (quantitative Messung), die 30 InP/InGaAsP DBR-Perioden enthält. Die aus den ersten Minima berechnete Mittenwellenlänge in Abhängigkeit von der Position auf dem Wafer in Abbildung 1 belegt, dass deren erreichte Stabilität den Zielen des Vorhabens (hier dargestellt durch den schraffierten Bereich) entspricht. Hinsichtlich dieser lateralen Homogenität erfüllen InGaAsP-basierte Strukturen auch in anderen Wellenlängenbereichen die anvisierten Spezifikationen von kleiner  $\pm 10$  nm über den gesamten 2"- Wafer (üblicher Abzug der 5 mm Randbereiche).

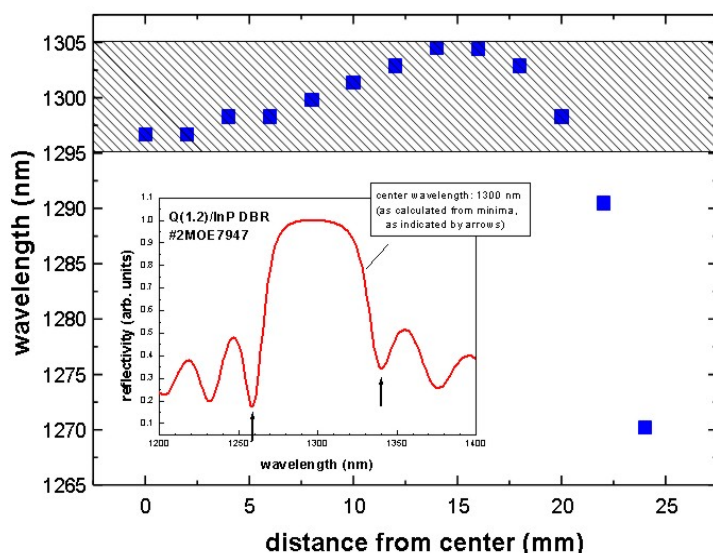


Abbildung 1: Laterale Verteilung der Zentrumswellenlänge eines 1300 nm GaInAsP/InP DBR vom Zentrum zum Rand eines 2-inch Wafers (der schraffierte Bereich verdeutlicht den spezifizierten Zielbereich). Das Insert zeigt das Reflektivitätsspektrum im Zentrum des Wafers.

Al-haltige DBR-Strukturen bieten wegen des größeren Brechungsindexsprunges die Möglichkeit, bei geringerer Anzahl der Perioden die gleiche Reflektivität zu erreichen. Wegen der Kompatibilität mit dem derzeit verwendeten MBE-Prozess bevorzugt der Projektpartner solche Strukturen. InP/InGaAlAs Strukturen wurden nach einem vom Projektpartner vorgegebenen Design mit 30 Perioden gewachsen und am HHI (qualitativ) bzw. bei VERTILAS (quantitativ) vermessen. Die Ergebnisse der Arbeiten fassen die beim Projektpartner gemessenen Resultate in Abbildung 2 zusammen. Die maximale Reflektivität erreicht spezifizierte Werte jenseits von 99%, aber im Gegensatz zu P-haltigen DBRs zeigen InGaAlAs-basierte Strukturen eine erhöhte laterale Inhomogenität der Mittenwellenlänge, wodurch nur ein begrenzter innerer Bereich des Wafers Bauelement-tauglich ist. Dieses Verhalten ist allerdings in erster Linie nicht materialbedingt, sondern wird wesentlich durch den MOVPE-Reaktor beeinflusst.

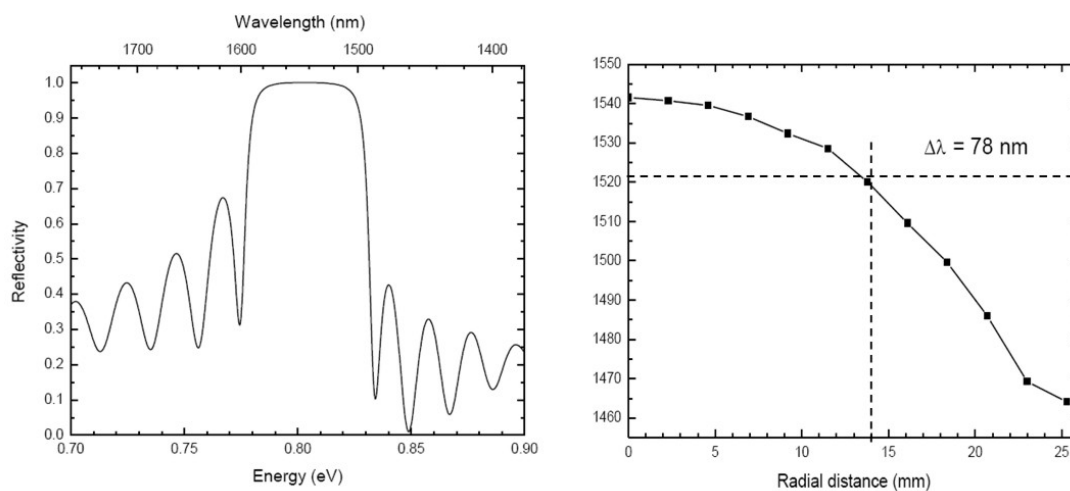


Abbildung 2: Quantitatives Reflektivitätsspektrum (links) und laterale Verteilung der Zentralwellenlänge eines 1550 nm InP/InGaAlAs DBR zwischen Zentrum und Rand eines 2" Wafers (rechts) (Messung: VERTILAS).

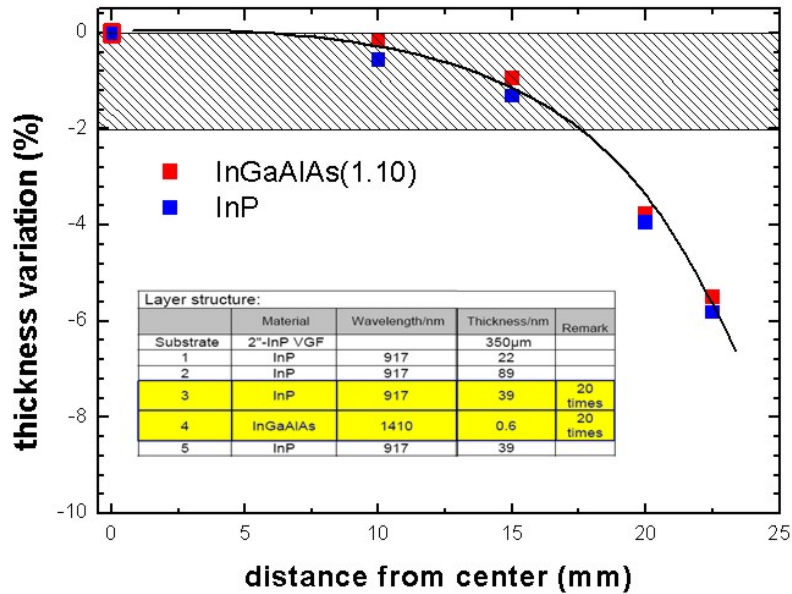


Abbildung 3: Laterale Variation der Wachstumsraten von InP und InGaAlAs zwischen Zentrum und Rand eines 2-inch Wafers eines 1550 nm InP/InGaAlAs DBR. Das Insert zeigt die für die Bestimmung der InGaAlAs Rate mittels XRD verwendete MQW Schichtstruktur.

Zur Analyse des beobachteten Verhaltens, das in DBR Strukturen primär in einer Dickeninhomogenität bedingt ist, wurden stark asymmetrische periodische Strukturen gewachsen (vgl. Insert in Abbildung 3) aus deren XRD Überstrukturreflexen Einzeldicken in Abhängigkeit von der lateralen Position extrahiert wurden. Dies ist für die beiden den DBR aufbauenden Schichten in Abbildung 3 zusammengefasst. Beide Materialien zeigen einen identischen Verlauf, sodass die beobachtete Wellenlängeninhomogenität auf beide Materialien zurückzuführen ist. Die bestimmte Größenordnung der lateralen Variation ist in quantitativer Übereinstimmung mit den aus den DBR-Daten berechneten Inhomogenitäten der Periode.

### 1.1.2 Wahl des Trägergases

Vor dem Hintergrund möglichst großer lateraler Homogenität wurde am HHI in den vergangenen Jahren an einer AIX200 MOVPE-Forschungsanlage ein auf N<sub>2</sub>-Trägergas basierender Epitaxieprozess parallel zum konventionellen H<sub>2</sub>-Prozess für Laserstrukturen entwickelt. Im Verlauf des Vorhabens wurde dieser Prozess auch auf Al-haltige Schichten angewandt. Abbildung 4 zeigt Ergebnisse der lateralen Verteilung der Emissionswellenlänge einer InGaAlAs MQW Schichtstruktur, die im aktiven Bereich der VCSEL Gesamtstruktur vorgesehen ist (s.u.). Die erreichte drastische Verbesserung ist in Abbildung 4 im Vergleich der beiden Reaktorgase ersichtlich. Im Fall des N<sub>2</sub>-Reaktorgases wird eine, bis auf die äußeren 5 mm, praktisch konstante Wellenlänge über einen 2" Wafer erreicht.

Im aktuellen Vorhaben wurde ausschließlich der so etablierte Prozess für alle beschriebenen Arbeiten eingesetzt. Weitere Verbesserungen in der Homogenität, auch für konventionelles Reaktorgas können mit einer Multiwafer-Anlage erreicht werden, die am HHI zwar verfügbar bzw. in der Einfahrphase war, aber für das Vorhaben im Berichtszeitraum nicht zur Verfügung stand.



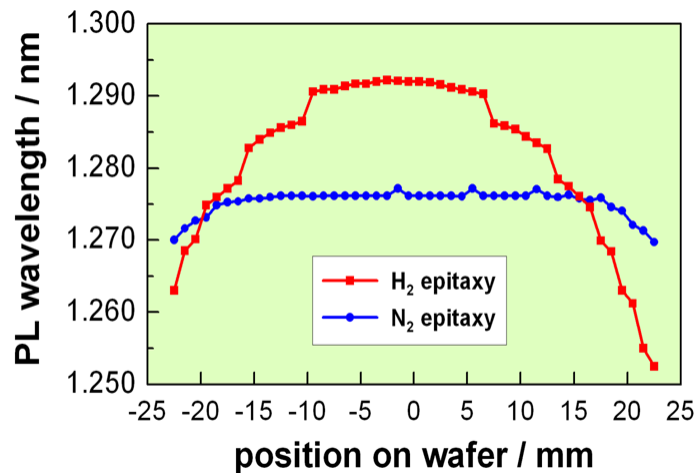


Abbildung 4: Verteilung der Emissionswellenlänge einer 1275...1290 nm InGaAlAs/InGaAlAs Multi-Quantumwell Struktur lateral über einen 2" Wafer, als Maß für die laterale Dickenhomogenität. Als Parameter wurde die Art des Trägergases im Reaktor variiert.

### 1.1.3 Zusammenfassung

Mit dem dargestellten Status hinsichtlich lateraler Homogenität waren die Möglichkeiten einer *single-wafer* Forschungsanlage offensichtlich ausgereizt. Neben der Möglichkeit, sich ausschließlich auf InGaAsP DBRs zu beschränken, würde durch den Einsatz von Multiwaferanlagen die Möglichkeit bestehen, auch bei Al-haltigen DBRs zu deutlichen Verbesserungen zu kommen.

Da sich im Verlauf des Projektes der Entwicklungsschwerpunkt seitens des Projektpartners zu *short-cavity* VCSELn, die vollständig ohne epitaktische DBRs auskommen, verlagerte, wurde auf den Transfer und die Optimierung Al-haltiger DBRs auf eine Multiwaferanlage verzichtet. Auch die in WP7 hergestellte VCSEL Struktur wurde in Absprache mit dem Projektpartner als short-cavity VCSEL, also ohne Halbleiter DBRs, ausgeführt.

## 1.2 WP4 – Epitaxie Tunnelkontaktstruktur

Ein gut funktionierender Tunnelkontakt, d.h. ein in Rückwärtsrichtung betriebener pn-Übergang mit geringem spezifischen Widerstand, ist essentiell für die Herstellung von BTJ-VCSEL-Strukturen (WP7). Notwendig sind Widerstandswerte von mind.  $< 10^{-3} \Omega\text{cm}^2$  bzw. Stromdichten von  $> 1\text{kAcm}^{-2}$  bei 1V Vorwärtsspannung an der Laserdiode. Für das Erreichen dieser Spezifikationen ist ein  $p^{++}/n^{++}$ -Übergang mit höchsten Dotierungen von jeweils größer als etwa  $5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$  Voraussetzung. Speziell für das Wachstum mit MOVPE, bei dem üblicherweise relativ hohe Wachstumstemperaturen (bei InP üblicherweise im Bereich  $650^\circ\text{C} - 700^\circ\text{C}$ ) verwendet werden, stellt das Erreichen derart hoher Dotierungen eine Herausforderung dar, sowohl hinsichtlich der erreichbaren Dotierungshöhe als auch damit verknüpfter Ausdiffusionseffekte.

### 1.2.1 Hochdotierung von InGa(Al)As mit konventionellen Dotierstoffen

Für den Einsatz in Tunnelstrukturen sollen n-seitig InGaAs und p-seitig InGaAlAs-Schichten verwendet werden. Daher wurden für  $n^{++}$ -InGaAs bzw.  $p^{++}$ -InGaAlAs Wachstumsparameter für Wachstumstemperaturen bis herunter zu  $500^\circ\text{C}$  erfolgreich optimiert, die bei Einzelschichten bzw. auch Heterostrukturen gleichzeitig störungsfreie Oberflächen und hohen Dotierstoffeinbau liefern. Die höchsten Dotierungen wurden bei  $500^\circ\text{C}$  erreicht. Eine weitere Absenkung war aus Gründen der exponentiell sinkenden Wachstumseffizienz und der drastisch sinkenden Schichtqualität nicht sinnvoll.

Als Dotanden wurden Schwefel und Zink verwendet. Schwefel lässt zwar gegenüber dem ansonsten favorisierten Silizium eine höhere Diffusivität erwarten, es konnte aber im Gegensatz zu Si mit Dotierungen  $> 10^{20} \text{cm}^{-3}$  der anvisierte Konzentrationsbereich übertroffen werden. Für die p-Dotierung von InGaAlAs mit Zink wurden ähnliche Werte, gemessen mittels Hall- und C/V-Verfahren, ermittelt. Trotz der sowohl für Schwefel als auch -noch stärker- für Zink allgemein beobachteten Tendenz zur Diffusion, zeigen die Ergebnisse, dass bei den hier verwendeten niedrigen Wachstumstemperaturen ihr Einsatz als zielführend anzusehen ist.

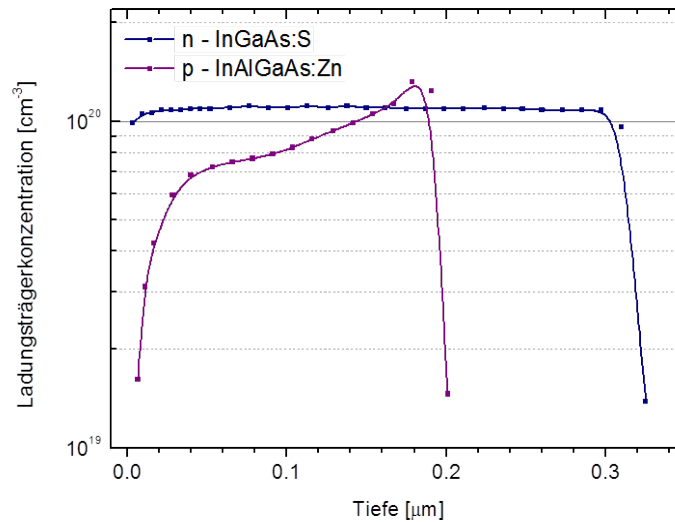


Abbildung 5: Dotierprofile für n++ InGaAs:S und p++ InGaAlAs:Zn, gemessen mit C/V-Profilung.

Mit den gewählten konventionellen Dotierstoffen wurden höchstdotierte Hetero  $p^{++}/n^{-}$ -Übergänge bei 500°C Wachstumstemperatur realisiert. Die Höhe und Gleichförmigkeit des Dotierstoffeinbaus in Wachstumsrichtung wurde mittels C/V-Profilung untersucht. Typische resultierende Dotierstoffprofile für n- und p-Dotierung sind in Abbildung 5 exemplarisch für 2 Schichten gezeigt. Das Erreichen höchster Konzentration in der gesamten Tiefe der Schicht ist klar ersichtlich. Das n-Profil zeigt einen sehr gleichförmigen Einbau, während das p-Profil etwas inhomogen ist, was als Hinweis auf Diffusion gedeutet werden kann. Entscheidend für die elektrische Funktion der Tunnelübergänge ist jedoch die Konzentration in unmittelbarer Nähe des pn-Übergangs, und es zeigt sich, dass hier Löcherkonzentrationen  $> 10^{20} \text{cm}^{-3}$  erzielt wurden.

## 1.2.2 Wachstum von n/p++/n++-InGa(Al)As Tunnelstrukturen

Zur Untersuchung der Eignung der oben beschriebenen Schichten für den Tunnelkontakt wurden dem VCSEL-Bauelement sehr ähnliche Teststrukturen hergestellt und prozessiert. Das Design der Struktur entspricht einem BTJ-VCSEL ohne DBR auf n-Substrat und wurde vom Projektpartner VERTILAS zur Verfügung gestellt (schematische Darstellung der prozessierten Teststruktur siehe Abbildung 6). Dieses Vorgehen ermöglicht eine sehr gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Tunnelkontakt im kompletten Bauelement, ermöglicht jedoch nur eine Auswertung über eine npn-Übergangsfolge. Dieser „Nachteil“ wurde bewusst in Kauf genommen, da ansonsten Testschichten auf semi-isolierendem oder p-Substrat hätten untersucht werden müssen, mit dem Risiko verfälschender Messergebnisse. Die Wafer wurden, ebenfalls nach Vorgaben und in Kompatibilität mit den beim Projektpartner verwendeten Prozessierungsschritten, jeweils mit 3 Lithografieschritten am HHI prozessiert. Die Ergebnisse sind somit sehr gut mit den Ergebnissen von durch VERTILAS prozessierten MBE Tunnelkontaktteststrukturen vergleichbar.

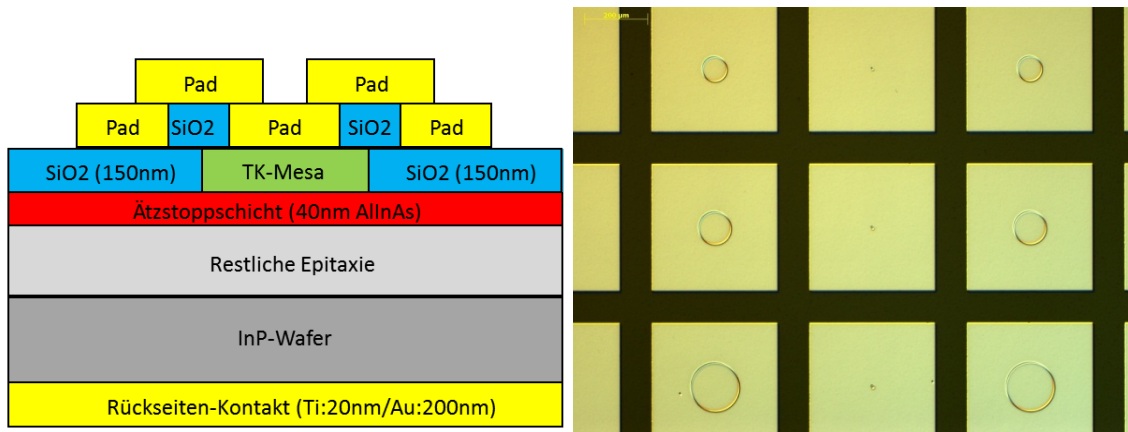


Abbildung 6 Links: Schematische Darstellung der prozessierten Teststruktur (TK = Tunnelkontakt). Rechts: Interferenzkontrast Mikroskopaufnahmen der prozessierten TK-Teststruktur.

Anschließend wurden an einem Spitzenmessplatz U-I-Kennlinien aufgenommen und analysiert. Alle vermessenen U-I-Kennlinien zeigen die gewünschten Diodenkennlinien (ein Beispiel ist in Abbildung 7 gezeigt).

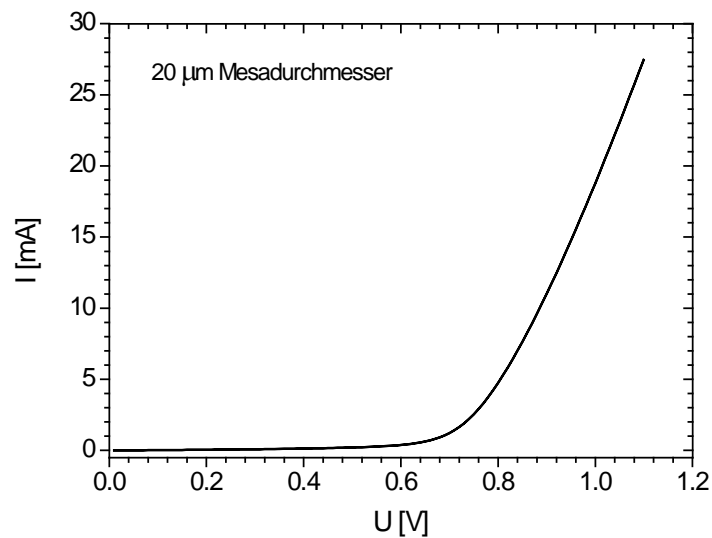


Abbildung 7: Beispiel einer U-I-Kennlinie, hier für 20μm TK-Mesadurchmesser.

Aus den gemessenen U-I-Kennlinien lassen sich aus den bekannten Mesadurchmessern die spannungsabhängigen Stromdichten und Kontaktwiderstände berechnen. Für 1 V Vorwärtsspannung wurden Stromdichten größer  $10^4 \text{ Acm}^{-2}$ , respektive spezifische Kontaktwiderstände besser als  $10^{-4} \Omega\text{cm}^2$  (siehe Abbildung 8), ermittelt, was die vom Projektpartner als Mindestanforderungen genannten Stromdichten von größer  $10^3 \text{ Acm}^{-2}$  bzw. Kontaktwiderstände von kleiner  $10^{-3} \Omega\text{cm}^2$  deutlich übertrifft.

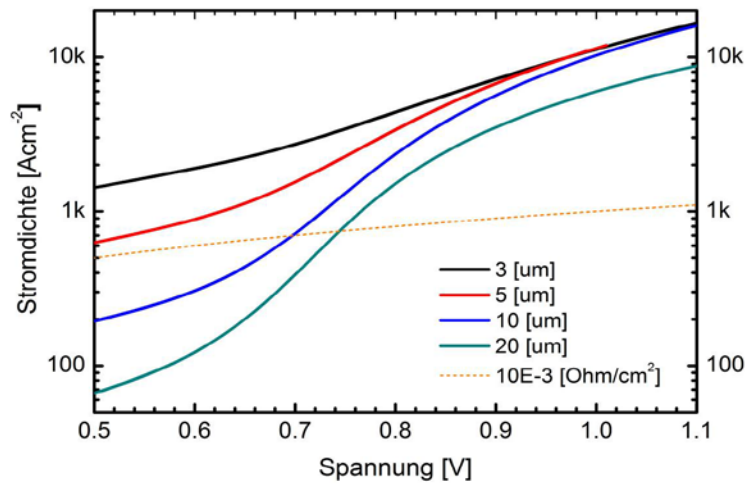


Abbildung 8: Spannungsabhängige Stromdichten für vier Mesadurchmesser in Flussrichtung. Die orange gepunktete Linie stellt den Verlauf der Stromdichte für einen ohmschen Kontaktwiderstand von  $10^{-3} \Omega\text{cm}^2$  dar.

### 1.2.3 Hochdotierung mit Kohlenstoff für p++ InGaAlAs und Wachstum von n/p++/n++-InGa(Al)As Tunnelstrukturen

Als Alternative zur p-Dotierung mit Zink für höchste Konzentrationen wurde Kohlenstoff untersucht, da er im Kristallgitter eine sehr geringe Diffusivität ausweist und bereits, insbesondere bei der MBE bzw. in GaAs-basierenden Materialien, erprobt ist. Als C-Quelle wurde  $\text{CBr}_4$  verwendet.

Für die p-Dotierung der InGaAlAs Schicht mit Kohlenstoff wurde, nach Untersuchungen bei 550 und 520°C, schließlich ebenfalls eine Wachstumstemperatur von 500°C gewählt. Als problematisch erwies sich die inhärent ätzende Eigenschaft des  $\text{CBr}_4$ . Bei den für die hohen Dotierungen notwendigen hohen  $\text{CBr}_4$ -Flüssen (der molare  $\text{CBr}_4$ -Fluss war für die maximal erzielte p-Dotierung ca. 2-mal größer als die Summe der molaren Flüsse der Gruppe III Ausgangsstoffe) betrug die Wachstumsrate nur noch ca. 50 nm/h. Eine weitere Steigerung des  $\text{CBr}_4$ -Flusses hätte somit keine oder eine negative (ätzen) Wachstumsrate ergeben. Auf Grund der niedrigen Wachstumsraten konnten keine hinreichend dicken Schichten für CV-Untersuchungen mit zuverlässigen Ergebnissen gewachsen werden. Aus den CV-Untersuchungen an sehr dünnen Schichten wurde eine maximale p-Dotierung von  $\sim 1,5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$  abgeschätzt.

### 1.2.4 Wachstum von n/p++/n++-InGa(Al)As Tunnelstrukturen

Darauf basierend wurden TK-Teststrukturen wie in Abschnitt 1.2.2 gewachsen, prozessiert und vermessen. Alle vermessenen U-I-Kennlinien zeigen ebenfalls das gewünschte Diodenverhalten. Aus den gemessenen U-I-Kennlinien lassen sich wiederum die spannungsabhängigen Stromdichten und Kontaktwiderstände berechnen. Für 1 V Vorwärtsspannung wurden Stromdichten zwischen 300 und  $650 \text{Acm}^{-2}$ , respektive spezifische Kontaktwiderstände zwischen  $3 \cdot 10^{-3} \Omega\text{cm}^2$  und  $1,5 \cdot 10^{-3} \Omega\text{cm}^2$  (siehe Abbildung 9), ermittelt, was die vom Projektpartner als Mindestanforderungen genannten Werte von größer  $10^3 \text{Acm}^{-2}$  bzw. von kleiner  $10^{-3} \Omega\text{cm}^2$  nicht erfüllte. Somit konnten zwar auch mit Kohlenstoff-Dotierung funktionierende Tunnelkontakte realisiert werden, diese erreichten aber nicht die geforderten Spezifikationen.

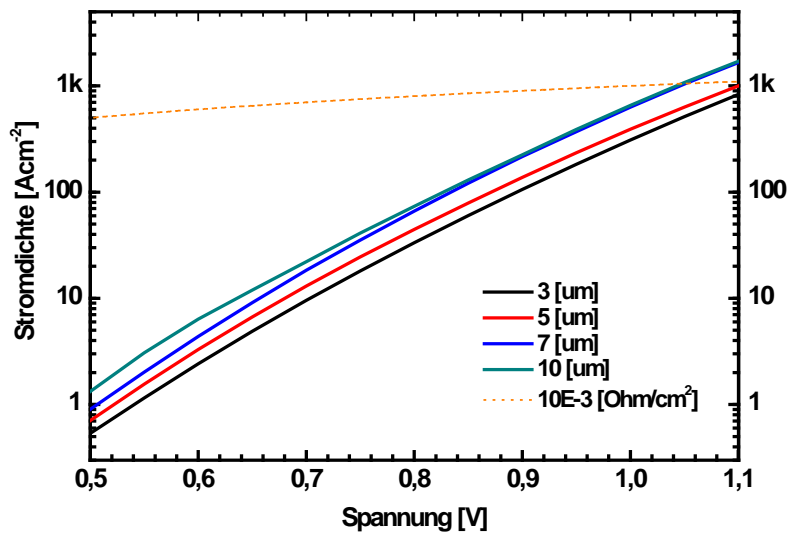


Abbildung 9: Spannungabhängige Stromdichten für vier Mesadurchmesser in Flussrichtung. Die orange gepunktete Linie stellt den Verlauf der Stromdichte für einen ohmschen Kontaktwiderstand von  $10^{-3} \text{ Ohm/cm}^2$  dar.

### 1.3 WP5 – MOVPE-Optimierung Tunnelkontaktüberwachung

In einem ersten Schritt wurden vom Partner VERTILAS MBE Basisstrukturen für den Zielbereich 1550 nm zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um  $n^{++}\text{-InGaAs/p}^{++}\text{-InGaAlAs}$  Strukturen, bei denen bis auf den Bereich kleiner Mesen die obere InGaAs-Schicht entfernt wurde. Somit ergibt sich als gleichzeitige Herausforderung für das Überwachen:

- i) die Entwicklung eines Reinigungsschrittes ohne merklichen Abtrag für eine Epitaxie-taugliche Oberfläche
- ii) das Überwachen einer Al-haltigen Oberfläche
- iii) das Überwachen von ca. 10 nm hohen Mesen mit einer 1  $\mu\text{m}$  dicken Schicht unter Erhaltung der Sichtbarkeit der Struktur (für Justagezwecke im Bauelementprozess).

Im Hinblick auf i) wurden auf Basis von Informationen vom Projektpartner und eigenen Erfahrungen aus diversen Bauelementprojekten am HHI vier verschiedene Präparationsprozesse untersucht. Dies sind im Einzelnen die folgenden Reinigungsschritte:

- HCl-Dip (HCl:H<sub>2</sub>O im Verhältnis 1:2) für 3 Sekunden
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Dip (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O im Verhältnis 1 : 300 entspr. 0.3 %) für 3 Sekunden
- HF-Dip (5 %) für 3 Sekunden
- KOH-Dip (20 %) für 10 Sekunden

Alle vier getesteten Prozesse zeigen keinen merklichen Abtrag. Dies ist in Abbildung 7 an Hand von SIMS-Profilen für Überwachungen nach allen vier individuellen Präparationsprozessen dargestellt. Gemessen wurde außerhalb der Mesastruktur. Dargestellt ist das quantitative Al-Signal beginnend mit der  $p^{++}\text{-InGaAlAs}$  Schicht des Tunnelkontaktes (präparierte Oberfläche) bis zum Ende der aktiven Zone. Die aufgewachsene InP Struktur bis ca. 1.11  $\mu\text{m}$  Tiefe wurde wegen der Übersichtlichkeit weggelassen. Die nominelle Schichtenfolge ist schraffiert

hinterlegt. Alle vier Präparationsmethoden lieferten identische Profile, die in Abbildung 10 zur Deckung gebracht sind. Damit sind alle vier Präparationsmethoden vergleichbar und anwendungstauglich.

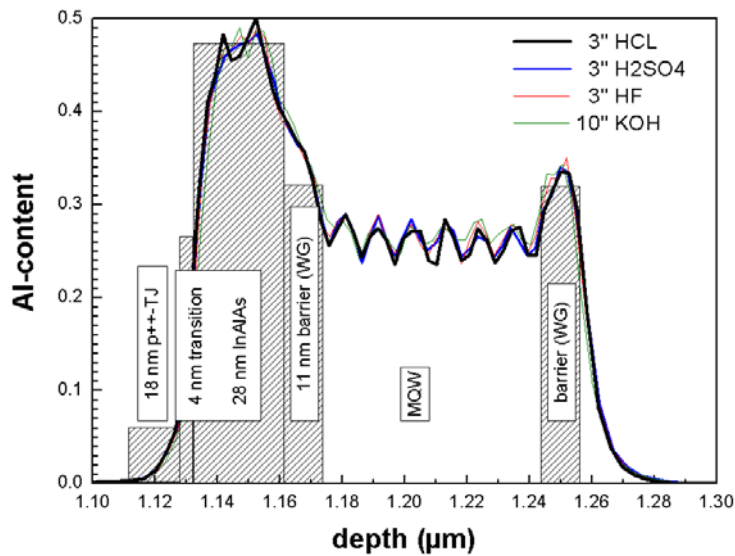


Abbildung 10: Quantitative SIMS Profile von Aluminium im Bereich der strukturierten Tunnelkontaktschichten (zwischen den VCSEL-Mesen) nach Überwachsen mittels MOVPE für vier verschiedene Oberflächenpräparationsmethoden. Die nominelle Schichtstruktur ist schematisch unterlegt.

Die Punkte ii) und iii) wurden an Hand interferenzmikroskopischer Aufnahmen nach dem Überwachsen mit einer ca. 1.1  $\mu\text{m}$  dicken Si-modulationsdotierten InP Schicht abgeklärt. Hierbei wurden zur Stabilisierung vor dem Überwachsen sowohl die konventionelle  $\text{PH}_3$  Stabilisierung als auch eine modifizierte  $\text{AsH}_3$ -Stabilisierung eingesetzt. Die resultierenden Oberflächen für beide Stabilisierungsprozesse sind in Abbildung 11 für " $\text{H}_2\text{SO}_4$ -präparierte" Oberflächen exemplarisch gezeigt. Die anderen Präparationsmethoden zeigen vergleichbare Resultate. Die morphologischen Unterschiede je nach Stabilisierung sind im Fall des  $\text{PH}_3$  auf die Austauschwechselwirkung  $\text{P} \leftrightarrow \text{As}$  vor dem Wachstum zurückzuführen, was zu einer hochverspannten  $\text{InGaAlAs}_{1-x}\text{P}_x$  Zwischenschicht führt. Dies kann durch Umschalten auf  $\text{AsH}_3$  bei erhöhten Temperaturen unterdrückt werden und liefert dann die in Abbildung 11 links gezeigten, mikroskopisch einwandfreien Oberflächen.

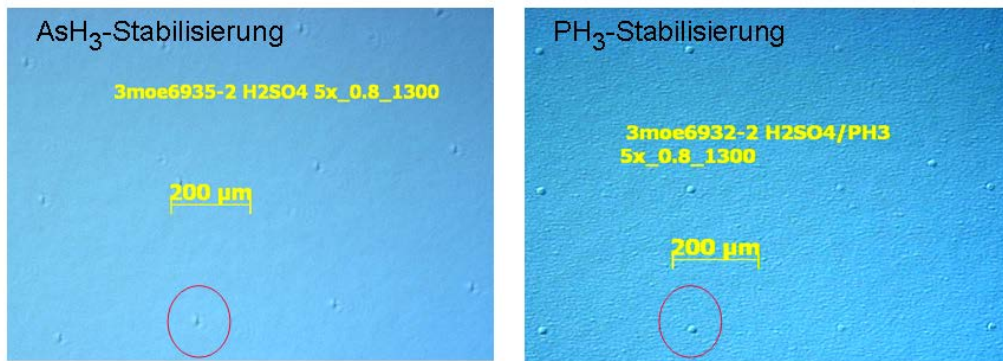


Abbildung 11: Interferenzkontrast Mikroskopaufnahmen MOVPE überwachsener (HHI) VCSEL-Strukturen (VERTILAS). Dargestellt sind Unterschiede in der Stabilisierung in der Hochheizphase vor Beginn des MOVPE Überwachsens. Rot eingekreist sind die vor dem Überwachsen ca. 15 nm hohen VCSEL Mesen, die nach ca. 1.1 µm Überwachsen noch sichtbar sind.

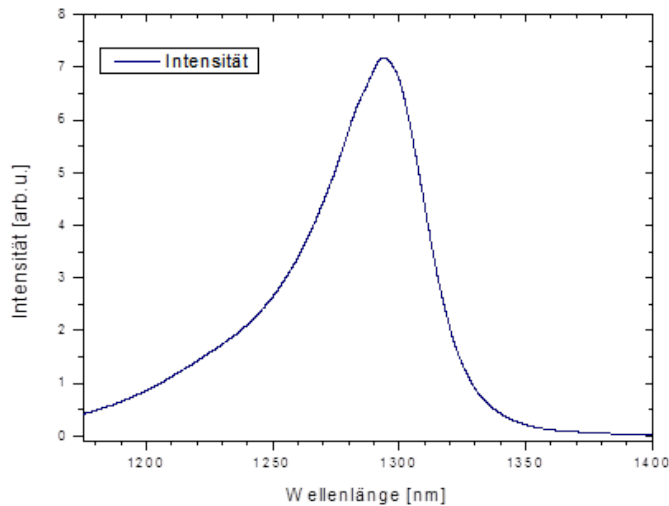
Die Mikroskopbilder belegen eindeutig, dass bei einem Al-Anteil von 5% bezogen auf die Gesamtheit der Gruppe-III-Atome keine Wachstumsirregularitäten, bedingt durch etwaiges stabiles Oberflächen-Aluminiumoxid, auftreten. Vermutlich, und im Einklang mit früheren MBE-Arbeiten, wird durch den im Stabilisierungsprozess entstehenden atomaren Wasserstoff ein Entfernen des Oberflächen-Aluminiumoxid erreicht. Auf Basis der genannten MBE Arbeiten wird erwartet, dass bis zu einem Al-Anteil von 20...25% störungsarmes Überwachsen möglich ist.

Zusätzlich belegen die Mikroskopbilder, dass auch mit der MOVPE bei adäquater Prozessführung ein komplettes Einebnen der ca. 15 nm hohen Mesen vermieden werden kann. Diese Mesen können als symmetrisch verteilte Punkte (rot eingekreist) erkannt und für den weiteren VCSEL-Prozess genutzt werden.

## 1.4 WP7 – Epitaktische Herstellung kompletter VCSEL-Schichtstrukturen

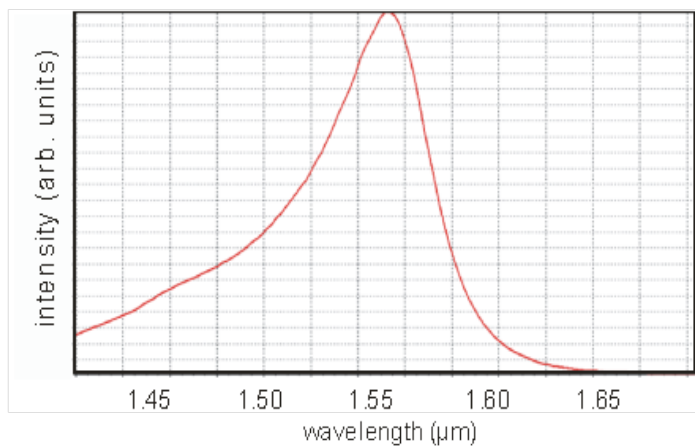
Auf Grund der vom Projektpartner mit short-cavity VCSELn erzielten sehr guten Ergebnisse und dem daraus resultierenden Interesse an derartigen Strukturen wurden die kompletten VCSEL-Schichtstrukturen als short-cavity VCSEL gewachsen. Neben den Tunnelkontakten und den im short-cavity Design nicht benötigten DBRs werden für die kompletten Bauelemente Wachstumsparameter für die aktive Zone mit den geforderten Wellenlängen benötigt.

Explizite Entwicklungsarbeiten für den Bereich der aktiven Zone fielen nicht an, aber es wurden Schichtenfolgen für VCSEL sowohl für den Anwendungsbereich 1550 nm als auch 1300 nm optimiert, und zwar im InGaAsP und im InGaAlAs Materialsystem. Dabei wurde auf das aus anderen Laseraktivitäten des HHI vorhandene Wissen zurückgegriffen. Beispielhaft sind in den Abbildung 12 und Abbildung 13 Photolumineszenzspektrum und Struktur aktiver Zonen für 1300 nm und 1550 nm Emissionswellenlänge dargestellt.



InGaAlAs	InGaAlAs	InGaAlAs
1100nm	für 1300nm	1100nm
-3000 ppm	+9000 ppm	-3000 ppm
10nm	7nm	10nm
1x	5x	5x

Abbildung 12: Emission einer für den Bereich 1300 nm ausgelegten und optimierten aktiven Zone in Form einer (teil)verspannungskompensierten InGaAlAs/InGaAlAs Multi-Quantum Well-Struktur (Designparameter s. Tabelle rechts) in Form des PL-Spektrums im Zentrum des Wafers.



Barriere	Well	Barriere
InGaAlAs	InGaAlAs	InGaAlAs
1280nm	für 1550nm	1280nm
-3000 ppm	+9000 ppm	-3000 ppm
10nm	7nm	10nm
1x	5x	5x

Abbildung 13: Emission einer für den Bereich 1550 nm ausgelegten und optimierten aktiven Zone in Form einer (teil)verspannungskompensierten InGaAlAs/InGaAlAs Multi-Quantum Well-Struktur (Designparameter s. Tabelle rechts) in Form des PL-Spektrums im Zentrum des Wafers.

Nach der dargestellten Entwicklung der einzelnen Komponenten und der kompletten Bauelementstruktur wurden nach den Spezifikationen des Projektpartners Strukturen für short-cavity VCSEL gewachsen. Dabei wurden sowohl Strukturen mit Zink als auch Strukturen mit Kohlenstoff als p-Dotand für den Tunnelkontakt hergestellt. Diese Strukturen wurden dem Projektpartner zur Verfügung gestellt. Auf Grund der Untersuchungen der Tunnelkontakte sollten vorrangig die Strukturen mit den erfolgversprechenderen Zink-dotierten Tunnelkontakten untersucht werden. Wegen der Lieferung an den Projektpartner erst gegen Projektende sowie des dortigen Einfahrens einer neuen Trockenätzanlagen konnten diese Strukturen nicht mehr im Zeitraum des Projektes prozessiert werden, so dass diesbezüglich noch keine Messergebnisse zur Verfügung standen.



## 1.5 WP9 – Transfer MOVPE-Prozess

Im Rahmen des Wachstums der kompletten VCSEL-Strukturen wurden wesentliche Teile der Struktur bereits auf eine, für eine Kleinserienproduktion besser geeigneten Aixtron 200/4 3x2 Zoll Anlage transferiert und gewachsen. Ein Transfer der Projektergebnisse fand, auf Grund der noch nicht gezeigten Bauelementtauglichkeit der am HHI hergestellten Strukturen, noch nicht statt, ist aber möglich.

## 2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

**Personalkosten:** geplant = 403.202,00 EUR; Ist = 456.125,23 EUR

**Material:** geplant = 84.846,00 EUR; Ist = 71.602,96 EUR

**Reisen:** geplant = 5.300,00 EUR; Ist = 3.505,26 EUR

Reisekosten in Höhe von 3.505,26 Euro fielen für die Teilnahme an den Projektstatustreffen beim Projektpartner und einer Reise zu einer internationalen Konferenz an.

**Investitionen:** geplant = 17.500,00 EUR; Ist = 0,00 EUR

Die geplante Investition in eine Sauerstoffüberwachung des N<sub>2</sub>-Trägergases erwies sich im Laufe der Untersuchungen als nicht notwendig.

**sonst. Sachkosten:** geplant = 9.600,00 EUR; Ist = 8.346,52 EUR

## 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die dargestellten Ausgaben entsprachen im Wesentlichen der Planung und werden angesichts der zeitlich und inhaltlich umfangreichen und kostenträchtigen technologischen Arbeiten, insbesondere MOVPE-Epitaxie, als notwendig und angemessen erachtet.

## 4 Voraussichtlicher Nutzen/Verwertbarkeit

Die Verwertung der Projektergebnisse erfolgt direkt durch den Projektpartner VERTILAS, indem dieser die erzielten Projektergebnisse direkt in die Entwicklung verbesserter bzw. neuer langwelliger VCSEL-Produkte einfließen lässt, solche Produkte selbst herstellt und vermarktet. Die wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse muss daher wesentlich vom industriellen Projektpartner betrieben werden. Die Arbeiten im Teilprojekt des HHI haben hierfür im wesentlichen Zuliefercharakter.

Seitens des HHI kann der entwickelte MOVPE-Prozess zur Herstellung langwelliger VCSEL zu marktüblichen Bedingungen zu VERTILAS transferiert werden. Darüber hinaus steht das HHI bei Bedarf für die Herstellung der VCSEL-Schichtstrukturen als „2nd source“ zur Verfügung. Eine derartige Absicherung für einen zentralen Herstellungsprozess stellt gegenüber Kunden einen vertrauensbildenden Nachweis für Lieferstabilität und damit einen möglichen Wettbewerbsvorteil dar.

Generell ist die p-Dotierung mit Kohlenstoff und die Herstellung von Tunnelkontakten, wie sie im Vorhaben untersucht wurden, auch für andere optoelektronische Bauelemente von Interesse (z. B. kaskadierte Hochleistungslaserdioden, in MQW-Lasern zur Geschwindigkeitserhöhung; p-dotierte InGaAlAs-Schichten in Avalanche-Photodioden), so dass weitere wissenschaftliche Anschlussfragen vorhanden sind. Das HHI wird sich weiter aktiv um die wissenschaftliche Vermarktung, d.h. die Akquise von Fördermitteln unter Einschluss der Projektergebnisse bemühen.

## 5 Fortschritt des Gebietes des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Walter Schottky Institut der Technischen Universität München präsentierte auf der 16. *International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy* 2012 in Busan (Südkorea) ein alternatives Konzept zur Herstellung von MOVPE gewachsenen Tunnelkontakten [1]. Dabei wurde das hoch zu dotierende p-InGaAlAs durch leichter mit Kohlenstoff zu dotierendes GaAsSb ersetzt. Zudem resultiert aus dem Typ-II Heteroübergang eine reduzierte Tunnelbarriere. Nachteilig ist die Notwendigkeit der Herstellung eines quaternären AlGaInAsSb:C gradings zu Loch-Injektion und die generell schwierige Herstellung Sb-haltiger Schichten, insbesondere im Zusammenhang mit Al-haltigen Schichten und auf MOVPE-Basis.

[1] C. Grasse et al.: *AlGaInAsPSb-based High-Speed Short-Cavity VCSEL with single-mode Emission at 1.3  $\mu$ m grown by MOVPE on InP substrate*

## 6 Veröffentlichungen

Seitens des HHI sind bisher keine Veröffentlichungen erfolgt. Der Projektpartner plant Veröffentlichungen der zum Projektende bzw. darüber hinaus gewonnenen Ergebnisse der gefertigten Bauelemente in einschlägigen Fachzeitschriften zu publizieren (siehe Bericht Vertilas), worin die Ergebnisse des vorliegenden Teilprojekts ggf. einfließen.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel <b>KMU-innovativ – Verbundprojekt: Langwellige BTJ-VCSEL auf MBE- und MOVPE-Basis (VCSEL) – Teilvorhaben: MOVPE-Entwicklung von BTJ-VCSEL-Strukturen</b>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] <b>Pötschke, Konstantin Grote, Norbert</b>	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2012
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <b>Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich Hertz Institut Einsteinufer 37 10587 Berlin Germany</b>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen <b>13N10448</b>
	11. Seitenzahl 19
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn</b>	13. Literaturangaben 12
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 13
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Langwellige VCSEL sind weltweit schon seit vielen Jahren Gegenstand intensiver FuE-Arbeiten. Auf InP-Basis hat sich dabei die am Walter-Schottky-Institut der TU München entwickelte <i>Buried Tunnel Junction</i> (BTJ) VCSEL-Struktur als technischer Ansatz herauskristallisiert, der inzwischen auch zu langwelligen VCSEL-Produkten geführt hat. Im vorgestellten Vorhaben wurde anstelle des MBE das MOVPE-Epitaxieverfahren eingesetzt, das für die Herstellung Phosphor-haltiger Materialien (InGaAsP/InP) unter kommerziellen Gesichtspunkten weltweit die bevorzugte Methode ist. Es wurden unter N <sub>2</sub> als Trägergas InP/InGaAsP und InP/InGaAlAs DBR hergestellt, wobei auf Grund unzureichender Schichtdickenhomogenität der InP/InGaAlAs DBR nur die InP/InGaAsP für die Anwendung im Bauelement geeignet waren. Bei reduzierter Wachstumstemperatur von 500°C wurden hochdotierte Schichten mit den Dotierstoffen Zink (p++) und Schwefel (n++) sowie Kohlenstoff (C, p++) und Schwefel hergestellt und jeweils Tunnelkontakte hergestellt. Während die Zn/S Tunnelkontakte eine sehr gute Performance zeigen, erreichen die C/S Tunnelkontakte die geforderten Spezifikationen nicht ganz. Nach der Entwicklung und Optimierung der Einzelschritte wurden short-cavity BTJ-VCSEL Strukturen mit MOVPE gewachsen. Eine (kommerzielle) Herstellung von short-cavity BTJ-VCSEL Strukturen unter Verwendung der MOVPE-Technologie wird, bei entsprechender Produkt orientierter Weiterentwicklung, als sehr aussichtsreich beurteilt. Hohe und höchste Dotierungen insbesondere mit Kohlenstoff und Tunnelkontakte sind neben der hier beschriebenen Anwendung auch für weitere Bauelemente von Interesse und können für zukünftige Entwicklungen eingesetzt werden.	

19. Schlagwörter InP, VCSEL, Tunnelkontakte, MOVPE, MOCVD	
20. Verlag Technische Informationsbibliothek – Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1B, 30167 Hannover	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) publication
3. title KMU-innovativ – Joint Project: Long wavelength BTJ-VCSEL based on MBE and MOVPE (VCSEL) – Sub-project: MOVPE-Development of BTJ-VCSEL-Structures	
4. author(s) (family name, first name(s)) Pötschke, Konstantin Grote, Norbert	5. end of project 30.06.2012
	6. publication date planned
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute Einsteinufer 37 10587 Berlin Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 13N10448
	11. no. of pages 19
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 12
	14. no. of tables
	15. no. of figures 13
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract Long-wavelength VCSELs have been the subject of intensive research and development work in the last years worldwide. Based on InP the Walter Schottky Institute of the Technical University of Munich developed Buried Tunnel Junction (BTJ) VCSEL structures, which emerged as a promising technical approach and has now led to long-wavelength VCSEL products. In the present project MOVPE instead of MBE has been used and evaluated for growing such structures. MOVPE is the preferred method for the commercial production of phosphorus-containing materials (InGaAsP / InP). Using N <sub>2</sub> as a carrier gas, we prepared InP / InGaAsP and InP / InGaAlAs DBR mirror structures, of which due to insufficient film thickness homogeneity of the InP / InGaAlAs DBR only the InP / InGaAsP variant appeared to be adequate for device applications. With reduced growth temperature of 500°C high-doped layers were prepared using the dopant combinations zinc (p++) and sulfur (n++), and carbon (p++) and sulphur, and tunnel contacts were produced respectively. While the Zn / S tunnel junctions performed very well, the C / S tunnel junctions did not reach the required specifications. After the development and optimization of the individual steps, short-cavity BTJ-VCSEL structures were grown by MOVPE. With further dedicated development efforts (commercial) production of short-cavity BTJ VCSELs grown by MOVPE will be feasible. High and highest doping, in particular with carbon, and tunnel junctions are, in addition to the application described here, also of interest for other electrical and photonic components and are applicable for future developments.	
19. keywords InP, VCSEL, tunnel junction, MOVPE, MOCVD	

20. publisher  
Technische Informationsbibliothek – Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1B,  
30167 Hannover

21. price