



Abschlussbericht des BMBF-Verbundvorhabens

Optische Transceiver-Module mit in-situ definierbaren spektralen Eigenschaften für optische Zugangsnetze

OPTIMISE

Laufzeit: 1.10.2008 – 31.3.2011



1. Zusammenfassung

Das Verbundvorhaben OPTIMISE hatte ursprünglich eine Laufzeit vom 1.10.2008 bis zum 30.9.2010 und wurde um ein halbes Jahr bis zum 31.3.2011 verlängert. Zum Verbund gehörten als Projektpartner das Fraunhoferinstitut für Silicatforschung, der Lehrstuhl für Technische Physik der Universität Würzburg, die Firmen nanoplus GmbH und Alcatel-Lucent an. Die Gesamtkoordination lag bei Alcatel-Lucent.

Für das Erreichen der Projektziele – Entwicklung eines abstimmbaren Halbleiterlasers auf der Basis einer optisch induzierten Brechzahländerung des Füllmediums, in welches das wellenlängenselektive Gitter eingebettet ist, - waren zwei Grundvoraussetzungen ganz wesentlich:

- Die Identifikation und Bereitstellung eines geeigneten ORMOCER[®]s als Füllmedium für das Gitter
- Die Entwicklung einer geeigneten funktionsfähigen Laserstruktur mit maximalem Überlapp von Lasermode und ORMOCER[®].

Diese beiden Grundvoraussetzungen bestimmen über den erzielbaren Brechungsindexhub und die daraus erreichbare Wellenlängenverschiebung im Laser ganz wesentlich den Projekterfolg.

Vom Fraunhofer ISC wurden insgesamt 27 ORMOCER[®]-Systeme mit unterschiedlichen organischen Funktionalitäten und photochemisch vernetzbaren Gruppen (mono- und bi-funktional in den organisch vernetzbaren Gruppen) synthetisiert und hinsichtlich ihrer Brechzahl charakterisiert. Des Weiteren wurde eine sequentielle Vernetzung der Materialien verifiziert. Aus diesen wurden schließlich aufgrund ihres hohen erreichbaren Brechzahlhubs neun Materialien ausgewählt, die hinsichtlich ihres Umsatzes bei einer photochemisch initiierten Vernetzung und ihrer Brechzahlen genauer charakterisiert wurden. Die Vernetzung wurde sowohl in Abhängigkeit der Initiatorkonzentration und -art sowie in Abhängigkeit der Belichtungsdosis untersucht. Abhängig vom Hybridmaterial und der Art der Vernetzung konnten Brechzahlhübe zwischen unbelichtetem und belichtetem Material zwischen 0,3 und ungefähr 5,2 % abhängig von den gewählten Prozessierungsparametern erreicht werden. Es wurden sechs potentiell für die Anwendung geeignete Materialsysteme hinsichtlich ihrer Prozessierbarkeit näher untersucht und der Firma nanoplus zur Verfügung gestellt.

Von der Universität Würzburg wurden geeignete Epitaxiestrukturen entwickelt und charakterisiert und anschließend dem Partner nanoplus zur weiteren Prozessierung bereitgestellt. Die fertigen Bauelemente sind hier dann auch abschließend messtechnisch charakterisiert worden.

Aufbauend auf den Epitaxieschichten der Universität Würzburg und unter Verwendung der vom Fraunhofer ISC gelieferten ORMOCER[®]e wurde von der nanoplus GmbH eine Vielzahl verschiedener DBR- und DFB-Laserstrukturen entwickelt. Anhand eines DBR-Lasers mit tief geätzten Rundgittern, die in einem Überlapp zwischen Lichtmode und ORMOCER[®] von fast 100 % resultieren, konnte eine Wellenlängenverschiebung von bis zu 2 nm durch UV-Belichtung des ORMOCER[®]s demonstriert werden. Um das zunächst flüssige ORMOCER[®] so weit zu stabilisieren, dass eine Prozessierung möglich ist, muss eine kurze Vorbelichtung stattfinden. Während dieser findet der größte Anteil des Brechungsindexhubs statt, so dass die abschließende Nachbelichtung nur in einer geringen Wellenlängenverschiebung resultiert. Es wurde deshalb eine sehr kurze Vorbelichtungszeit angestrebt, um möglichst große Anteile des Indexhubs für die eigentliche Verschiebung der Wellenlänge zur Verfügung zu haben.

Basierend auf ORMOCER[®]en mit größerem Indexhub wurden neue DFB-Strukturen entwickelt, mit denen die bisherigen Rekordwerte für die Kopplung zwischen einer in einem Stegwellenleiter geführten Mode und einem umgebenden Material mit niedrigem Brechungsindex weit übertroffen werden konnten. Durch Einfüllen eines Polymers (PMMA) konnte mit diesen Bauteilen eine Wellenlängenänderung von 13 nm erreicht werden (verglichen mit reiner Luftfüllung, keine Abstimmbarkeit).

Im Rahmen der begrenzten Laufzeit des Verbundvorhabens gelang es dann leider nicht mehr, weitere diskutierte Designideen für die Lichtquelle als auch andere, mehr Erfolg versprechende Varianten des ORMOCER[®]-Materialsystems zu untersuchen.

So konnte auch kein abstimmbarer Laser auf ORMOCER[®]-Basis mehr in dem von Alcatel-Lucent aufgebauten Labordemonstrator unter realitätsnahen Bedingungen vor allem in Hinblick auf die Wellenlängeneinstellung im System getestet werden. Der Labordemonstrator hätte den Betrieb in einem WDM-PON-System mit 8 Kanälen ermöglicht. So konnte lediglich die prinzipielle

Funktionsfähigkeit der Steuerelektronik und des Protokolls zur Wellenlängeneinstellung anhand eines Dummy-Bauelementes demonstriert werden, indem die Wellenlängenänderung mittels eines Peltier-Elements über die (limitierte) thermische Verschiebung der Wellenlänge realisiert bzw. simuliert wurde.

2. Zielsetzung

Das Hauptziel des Gesamtvorhabens war, einen kostengünstigen abstimmbaren Halbleiterlaser für den Einsatz in optischen Zugangsnetzen zu entwickeln. Um in sog. WDM-PON-Systemen (**w**avelength-**d**ivision **m**ultiplexed **p**assive **o**ptical **n**etworks) zahlreiche optische Kanäle mit jeweils unterschiedlicher Wellenlänge kosteneffizient realisieren zu können, werden optische Sender mit einfach einstellbarer Wellenlänge benötigt. Die Verwendung von Lasern mit jeweils dezidiertem Emissionswellenlänge ist bei Millionen optischer Verbindungen mit einem hohen logistischen Aufwand für Installation und Reparatur verbunden sowie insbesondere mit der Gefahr, im Bedarfsfall einen Laser mit der falschen Wellenlänge zu verwenden. Abstimmbare oder flexibel einstellbare Laser waren mit den zu Projektbeginn bekannten Technologien noch nicht derart kostengünstig, wie das für den extrem Kosten-sensitiven Zugangsmarkt nötig ist, zu realisieren.

Deshalb sollte ein einziger Lasertyp für alle Kanäle einsetzbar sein, wobei die Emissionswellenlänge erst bei der Installation im Netz festgelegt wird.

Für diesen Ansatz sollte in diesem Projekt eine neuartige Lösung erarbeitet werden, bei der Halbleiter-Lichtquellen mit einer Emission in einem breiten vordefinierten Wellenlängenband hergestellt werden, deren genaue Wellenlänge aber erst nachträglich, also beim Anschluss ans Netz, über die Brechzahl endgültig festgelegt und dann „eingebrennt“ wird. Hierbei sollte die optisch induzierte Änderung der Brechzahl in anorganisch-organischen Hybridpolymeren (sog. ORMOCER®en) ausgenutzt werden.

Im diesem Projekt wurde ein neuartiger Ansatz verfolgt, bei dem die Emissionswellenlänge von Halbleiterquellen durch eine Gitterstruktur (Bragg-Gitter) vorgegeben ist, die in einer Hybridpolymer-Matrix eingebettet ist. Durch nachträgliche Änderung der Brechzahl des verwendeten Hybridpolymers, beispielsweise mit Hilfe einer zusätzlichen UV-Hilfslichtquelle, sollte die genaue Emissionswellenlänge des Lasers nachträglich fein eingestellt werden. Dabei sollte es sich um eine dauerhafte Änderung des Brechungsindex handeln, so dass auf diese Weise eine Lichtquelle für nur einen WDM-Kanal entsteht. Sie kann nach dieser Behandlung nicht mehr auf einen anderen Kanal abgestimmt werden. Andererseits könnten aber mit einem einzigen Modultyp Lichtquellen für mehrere WDM-Kanäle in einem weiten Wellenlängenbereich bereitgestellt werden.

Die WDM-Quellen sollten für den Einsatz in PONs geeignet sein, speziell für die Übertragung in Upstream-Richtung vom Teilnehmer zum Verteilknoten, was üblicherweise im 1300 nm-Bereich geschieht. Die Arbeiten im Verbund umfassten die gesamte Wertschöpfungskette von der Definition und Spezifikation der Anwendung, der Materialherstellung und Bauelement-Strukturierung, des Designs und der Herstellung eines geeigneten Moduls bis hin zu Systemtests in Zugangsnetzen.

3. Ergebnisse der Teilvorhaben

3.1 Anorganisch-organische Nanostrukturmaterialien mit in-situ einstellbarer Brechzahl für optische Transceiver-Module (Fraunhofer ISC)

Die Anforderungen an ORMOCER®e für den Einsatz in abstimmbaren Lasern sind vielfältig, wobei insbesondere eine UV-induzierte, kontrollierte Veränderung der Brechzahl, eine hohe chemische, thermische und mechanische Stabilität, Lagerungsbeständigkeit sowie eine hohe Kompatibilität zu Standard-Prozesstechniken der Laserherstellung gefordert sind.

Die Beeinflussung der Brechzahl erfolgt dabei über die Verdichtung des Materials durch Licht-induzierte Polymerisation und auch über die Licht-induzierte Generierung von chemischen Funktionalitäten mit anderer Polarisierbarkeit. Steuerungsgröße ist hierbei wesentlich die Materialzusammensetzung, die über Parameter wie funktionelle Gruppen, sterische Wechselwirkung sowie Strukturbildung, die Eigenschaften wie Dichte, thermischen Ausdehnungskoeffizienten, Brechzahl, thermo-optische Koeffizienten oder auch Polarisierbarkeit, beeinflusst. Zum anderen spielen

Initiatorart und -menge sowie die verwendete Energiedosis eine erhebliche Rolle im Vernetzungsprozess.

Die stufenweise Vernetzung und das kontrollierte Anhalten des Vernetzungsprozesses konnte anhand verschiedener Materialsysteme mittels UV-DSC-Untersuchungen nachgewiesen werden. Dazu wurden reine Acrylat-, Methacrylat- und Styrylsysteme sowie auch ein bifunktionales ORMOCER[®] (OC-20), das zwei photochemisch unterschiedlich reaktive Gruppen (Methacrylat- sowie Epoxidgruppen) enthielt, untersucht. Die bei der Anwendungswellenlänge von 1310 nm bestimmten Brechzahlhübe (gesehen über alle untersuchten Materialsysteme und Formulierungen) von unvernetztem Harz zur vernetzten Schicht ($\Delta n = n_{\text{Schicht}} - n_{\text{Harz}}$) von 0,3 bis ca. 3,83 % für eine rein radikalisch initiierte Vernetzung der C=C-Bindungen konnte für OC-20 von $\Delta n \approx 3,4$ bzw. 3,57 % (nur radikalische Vernetzung der Methacrylat-Gruppen) durch eine Vernetzung beider Funktionalitäten auf bis zu $5,24 \pm 0,19\%$ gesteigert werden. Dazu wurden die OC-20-Harze mit radikalischem und kationischem Photoinitiator formuliert.

Neben den Untersuchungen zum Umsatz und den dadurch erreichbaren Brechzahlhüben wurden erste Klimatests (85 °C / 85 % rel. Feuchte) an ausgewählten ORMOCER[®]-Schichten mit dem Ziel durchgeführt, die Stabilität der Schichten, des Umsatzes und damit auch der Brechzahl zu untersuchen.

Vor der Lagerung erfolgte bei ersten Tests eine Charakterisierung der Schichten mittels μ -Raman-Spektroskopie an jeweils fünf markierten Messbereichen pro Probe. Die Markierungen sollten dazu dienen, die spektroskopischen Daten immer in einem ähnlichen Bereich der Schichten aufzunehmen.

Die Charakterisierung wurde im Anschluss daran in verschiedenen Zeitabständen durchgeführt und die prozentuale Änderung des Umsatzes bestimmt. Zunächst wurden drei verschiedene ORMOCER[®]-Schichten (Methacrylat- bzw. Styryl-Gruppen als vernetzbare Funktionalitäten) für ca. 2000 h im Klimaschrank bei 85 °C und einer relativen Feuchte von 85 % gelagert und anschließend nochmals spektroskopisch mittels μ -Raman-Spektroskopie charakterisiert. Alle untersuchten Schichten zeigen keine augenfälligen Veränderungen, wie z. B. Rissbildung oder Delamination. Bei der Auswertung der spektroskopischen Daten nach der Lagerung wurden zum Teil widersprüchliche Ergebnisse gefunden, wie z. B. ein niedrigerer C=C-Umsatz als vor der Lagerung. Das bedeutet, dass eine Charakterisierung anhand von fünf Messpunkten, deren exaktes Auffinden zur Messung nach der Lagerung trotz Markierung schwierig war, nicht aussagekräftig genug ist. Es wurde entschieden, auf eine Charakterisierung mittels Raman-Imaging zurückzugreifen. Dabei wird ein festgelegtes Gebiet auf der Probe abgerastert und Spektren in jedem Punkt der Rasterung aufgenommen und ein Mittelwertspektrum, das dann weiter hinsichtlich des C=C-Umsatzes ausgewertet wird, aufgenommen.

Zur Überprüfung der Eignung dieses Verfahrens wurden in einem weiteren Test Proben aus dem Material OC-20 (radikalischer Initiator zur Vernetzung der C=C-Bindungen der Methacrylatgruppen) für 164 h bei 85 °C / 85 % rel. Feuchte gelagert. Dabei wurden Schichten ausgewählt, die einerseits kurz und andererseits lange belichtet wurden. Vor und nach dem Test wurde die Brechzahl der Proben bei 1310 nm am Prismenkoppler und der C=C-Umsatz mittels μ -Raman-Imaging bestimmt. Bei einer lange belichteten Probe (300 s) bleibt der C=C-Umsatz im Rahmen der Fehlergrenze des Messverfahrens unverändert. Die Brechzahl dieser Probe ist jedoch niedriger als vor dem Klimatest. Bei der am kürzesten belichteten Probe erhöht sich der C=C-Umsatz, die Brechzahl jedoch ist nach dem Test niedriger als zuvor. Nach dem Klimatest hat sich der C=C-Umsatzgrad verringert, die Brechzahl ist größer.

Diese Beobachtungen verdeutlichen, dass die im Rahmen des OPTIMISE-Projekts durchgeführten Klimatests lediglich als Anhaltspunkt für weitere Untersuchungen dienen können, da das Klimaverhalten sehr empfindlich von der Nanostruktur der jeweiligen Materialien abhängt. Diese ist jedoch wiederum stark abhängig von der gewählten Vernetzungssteuerung und den Prozessparametern. Daher sollten im Weiteren lediglich an für die Anwendung geeigneten Hybridpolymeren nach vollständiger Charakterisierung der Prozesse und der zugrunde liegenden Bauelemente Klima-Feldtests durchgeführt werden. Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass die gewählten Bedingungen deutlich anspruchsvoller sind als später im gepackten Modul.

Im Laufe des Projekts wurden sechs verschiedene Materialformulierungen aufgrund ihrer guten optischen Eigenschaften dem Projektpartner nanoplus zur Herstellung ihrer Laserbauelemente zur Verfügung gestellt. Da die Firma nanoplus über einen Maskenbelichter verfügt, der lediglich über die Option einer Belichtung unter Atmosphärenbedingungen verfügt und auch keine sehr kurzen Belichtungszeiten gestattet, wurden seitens nanoplus Bauelemente hergestellt, die im Reinraum des

Fraunhofer ISC zunächst mit den ausgewählten ORMOCER®-Systemen beschichtet und anschließend zur Fixierung des ORMOCER®s auf der Laserstruktur sehr kurz belichtet wurden. Die weitere Prozessierung wurde dann bei nanoplus durchgeführt.

Dazu mussten zunächst für die ausgewählten Laserdesigns geeignete Prozesse zur Beschichtung und Belichtung mit den ausgewählten ORMOCER®-Systemen am Fraunhofer ISC entwickelt werden. Vorteile dieses Vorgehens lagen in der Möglichkeit, auch Sauerstoff-empfindliche Systeme zu belichten und auch die Belichtung für Expositionsdauern von nur 0,1 s durchführen zu können.

Durch das Laserdesign war ein Schichtdickenbereich für die ORMOCER®-Schicht vorgegeben, den das ORMOCER® nach der Beschichtung des Bauelements, einer sehr kurzen Belichtung zur Fixierung des Materials auf dem Laserbauelement und der anschließenden Entwicklung der Strukturen haben musste. Die Bauelemente sollten mittels Spin-Coating beschichtet werden. Daher war es erforderlich, für jede Materialformulierung und jedes Laserdesign jeden einzelnen Prozessschritt (Beschichtung, Temperschritte, Belichtungsstrategie zur Vorfixierung, Entwicklungsschritte) speziell anzupassen, was einen großen Parameterraum lieferte. Darüber hinaus ist die Probengröße mit nur 1 cm² sehr klein, wodurch der Einfluss des Substratrands auf die Nass-Schichtdicke und die Qualität der Beschichtung signifikant ist.

3.2 Epitaxie und Charakterisierung von Laserschichten für Lichtquellen mit einstellbarer Emissionswellenlänge (Universität Würzburg)

Herstellung und Charakterisierung von Referenzstrukturen

In enger Absprache mit dem Verbundpartner nanoplus GmbH wurde Epitaxiematerial für Prozesstests zur Einbringung von ORMOCER® in die Laserprozessierung sowie für die Herstellung von DBR-Lasern hergestellt. Abbildung 1a zeigt beispielhaft den Aufbau einer solchen Laserstruktur. Die Mantelschichten bestehen dabei aus 1500 nm dickem Al_{0,4}Ga_{0,6}As und sind mit Silizium bzw. Kohlenstoff n- bzw. p-dotiert. Das Wachstum endet mit einer hoch p-dotierten Kontaktschicht für die Herstellung eines effizienten Ohm'schen Kontaktes. Der hauptsächlich undotierte Wellenleiter besteht aus GaAs. Der aktive Bereich in der Mitte des Wellenleiters besteht aus einem einzelnen 7 nm dicken GaInNAS-Quantenfilm, der in sogenannte Strain-compensating layers (SCLs) aus GaAsN eingebettet ist. Von allen Laserschichten wurden Breitstreifenlaser mit unterschiedlicher Länge zur Bestimmung interner Laserparameter prozessiert. Aus der Auftragung der Schwellenstromdichte gegen die inverse Resonatorlänge (Abb. 1b) ergeben sich für die in Abb. 1a gezeigte Struktur eine Transparenzstromdichte von $J_{tr}=247 \text{ A/cm}^2$ und ein modaler Verstärkungsfaktor von $\Gamma g_0=46.3 \text{ cm}^{-1}$. Die Auswertung der externen Quanteneffizienz als Funktion der Länge (Abb. 1c) liefert eine interne Quanteneffizienz von $\eta_i=72\%$ und eine interne Absorption von $\alpha_i=4.1 \text{ cm}^{-1}$. Die Schwellenstromdichte bei der Standardlänge von 1,0 mm beträgt ca. 350 A/cm². Die erreichten Werte sind absolut konkurrenzfähig zu publizierten Bestwerten für GaInNAS-Laser in diesem Wellenlängenbereich [1].

Neben der Prozessierung von Breitstreifenlasern wurden die Schichten auch durch Sekundärionenmassenspektroskopie (zur Kontrolle des Dotierverlaufs) sowie mittels Transmissionselektronenmikroskopie untersucht.

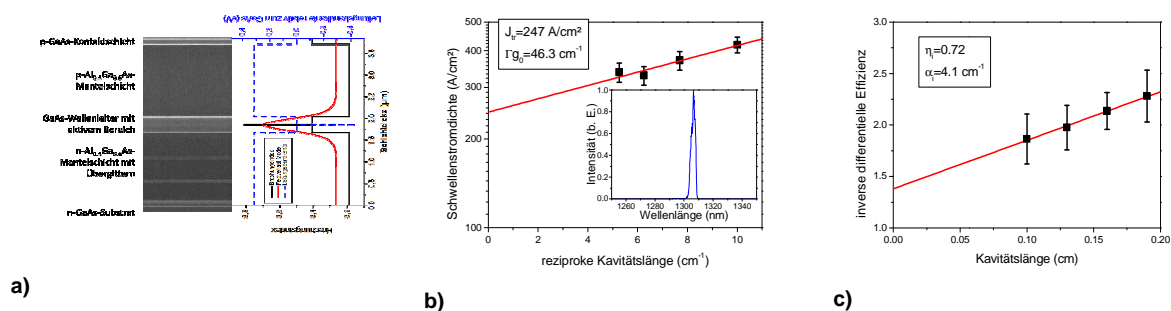


Abbildung 1: a) Typischer Aufbau des Referenzmaterials mit Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer solchen Struktur sowie simuliertem Verlauf von Leitungsbandkante, Brechungsindex und Intensität der geführten Lichtwelle. b) und c) Auswertung längenabhängiger Messungen zur Bestimmung interner Laserparameter. Der Inset in 1b zeigt ein Emissionsspektrum eines Breitstreifenlasers.

Wachstum von Laserstrukturen mit Al_xGa_{1-x}As-Schicht mit hohem Al-Gehalt von x>95%

Um bei der Einstellung der Emissionswellenlänge der Bauelemente einen möglichst breiten Abstimmbereich zu erreichen ist zum einen eine hinreichend große Brechungsindexänderung des ORMOCER[®]s erforderlich, zum anderen muss der Überlapp der Lasermode mit dem ORMOCER[®] ausreichend groß sein. Ein Ansatz zur Erhöhung des Überlapps war die Oxidation einer in den Laser integrierten Al_xGa_{1-x}As-Schicht mit hohem Al-Gehalt zu AlO_x mit einem Brechungsindex wie bei ORMOCER[®]en und damit einer besseren Anpassung der Modenföhrung an das ORMOCER[®]. Zunächst wurde das Wachstum an Teststrukturen optimiert, als nächster Schritt erfolgte die Integration der hochprozentigen Al_xGa_{1-x}As-Schicht in eine Laserstruktur. Abbildung 2 zeigt den Schichtaufbau einer solchen Struktur zusammen mit der Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer der hergestellten Strukturen. Die Schichtkomposition der Oxidationsschicht wurde mit HR-XRD (high-resolution x-ray diffraction) kontrolliert. Eine Optimierung der Strukturen erfolgte durch Anpassung der Dotierkonzentration, Reduktion der Wellenleiterdicke von ca. 600 nm auf ca. 370 nm und eine asymmetrische Positionierung des Quantenfilms im Wellenleiter. Weiterhin wurden Proben ohne die 1000 nm Mantelschicht untersucht. Abbildung 2b und 2c zeigen exemplarisch die Daten einer solchen optimierten Struktur. Die Emissionswellenlänge liegt exakt im Zielbereich bei 1300 nm. Aus der Auswertung der experimentellen Daten bestimmen sich die internen Laserwerte zu $J_{tr}=226\text{ A/cm}^2$, $\Gamma g_0=48\text{ cm}^{-1}$, $\eta_i=88\%$ und $\alpha_i=15,8\text{ cm}^{-1}$. Die Schwellenstromdichte bei einer Standardlänge von 1,0 mm beträgt 365 A/cm². Damit wurden im Vergleich zur bei einer ähnlichen Wellenlänge emittierenden Referenzstruktur identische oder sogar leicht bessere Werte erzielt. Einzig die internen Verluste α_i sind signifikant höher, was allerdings eine Konsequenz der o. g. Anpassung des Strukturdesigns an die Anforderungen der Anwendung ist, da die reduzierte Wellenleiterdicke zu einem erhöhten Überlapp der Lichtwelle mit der zusätzlich höher p-dotierten Mantelschicht und folglich zu erhöhten internen Verlusten auf Grund von Absorption an freien Ladungsträgern bzw. erhöhter Inter-Valenzband-Absorption führt.

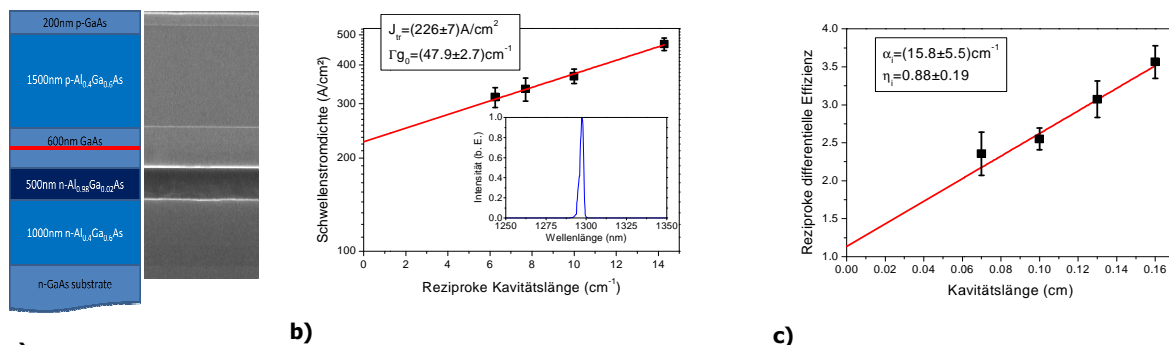
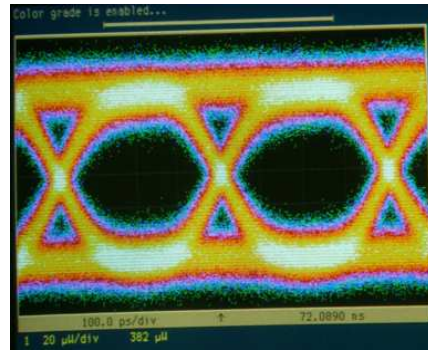
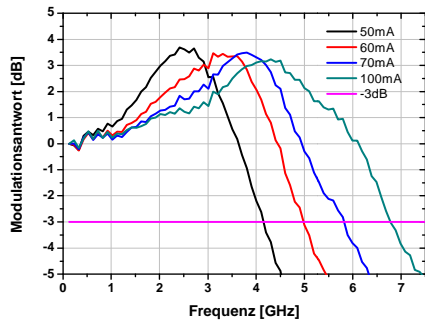


Abbildung 2: a) Schichtaufbau einer Laserstruktur mit integrierter hochprozentiger Al_{0,98}Ga_{0,02}As - Schicht. b) und c) Ergebnisse längenabhängiger Messungen zur Extraktion interner Laserparameter

Dynamische Untersuchungen an Laserstrukturen

Abb. 3a zeigt die gemessene Modulationstransferfunktion eines 600 μm langen, von nanoplus prozessierten GaInNAs DFB-Lasers. Die Resonanzfrequenz und die Modulationsbandbreite des Lasers nehmen mit steigendem Pumpstrom zu. Bei einem Betriebsstrom von 100 mA erreicht der Laser eine Kleinsignalmodulationsbandbreite von knapp 7 GHz. Eine Modulation mit einer Bitrate von 2,5 Gbit/s ist damit auf alle Fälle möglich, evtl. sogar die Übertragung von 10 Gbit/s. Weiterhin wurden Großsignalmessungen an den Lasern durchgeführt. Der Laser wird dabei von einem Mustergenerator angesteuert, der eine (pseudo-) zufällige Binärsequenz von Strompulsen liefert. Für die Messungen stand allerdings nur ein Mustergenerator mit einer Bitrate von 2,5 Gbit/s zur Verfügung, so dass die Tauglichkeit der Laser für eine Bitrate von 10 Gbit/s nicht direkt nachgewiesen werden konnte. Abb. 3b zeigt ein mit einem Sampling-Oszilloskop gemessenes Augendiagramm des Lasers bei einer Modulation von 2,5 Gbit/s. Die Augen sind deutlich geöffnet, d.h. der Laser kann problemlos mit dieser Bitrate betrieben werden.



a)

b)

Abbildung 3: a) Modulationsantwort eines 600μm langen Lasers für Ströme von 50, 60, 70 und 100 mA. Alle Kurven sind für kleine Frequenzen auf 0dB normiert.
b) Augendiagramm unter Großsignalmodulation mit einer Bitrate von 2.5 Gbit/s

3.3 Herstellung monomodiger Halbleiterlaserdioden mit einstellbarer Wellenlänge auf Basis nanostrukturierter ORMOCER®e (nanoplus)

Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung einer schmalbandigen Halbleiterlaserquelle, bei der die Emissionswellenlänge durch eine in ein Hybridpolymer eingebettete bzw. eine durch ein Hybridpolymer definierte Gitterstruktur vorgegeben wird. Mittels einer nachträglichen Änderung der Brechzahl des Hybridpolymers, z.B. durch zusätzliche UV-Bestrahlung, sollte dann die exakte Zielwellenlänge eingestellt werden. In einer ersten Phase sollte der grundlegende Mechanismus der externen Wellenlängeneinstellung anhand einer DBR-Laserquelle untersucht werden. Anschließend sollten die so gewonnenen Erkenntnisse auf eine Laserstruktur mit verteilter Rückkopplung (DFB-Laser) übertragen werden.

Zunächst wurden DBR-Laser mit einem flach geätzten Rundgitter hergestellt, welches mit ORMOCER® aufgefüllt wurde (s. Abbildung 4). Der durch eine 90sekündige Nachbelichtung des ORMOCER®s erzielte geringe Brechungsindexhub erwies sich allerdings als nicht ausreichend, um eine beobachtbare Verschiebung der Emissionswellenlänge zu erzielen (s. Abbildung 5).

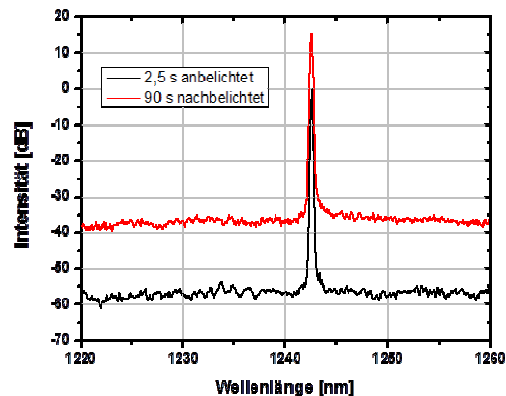
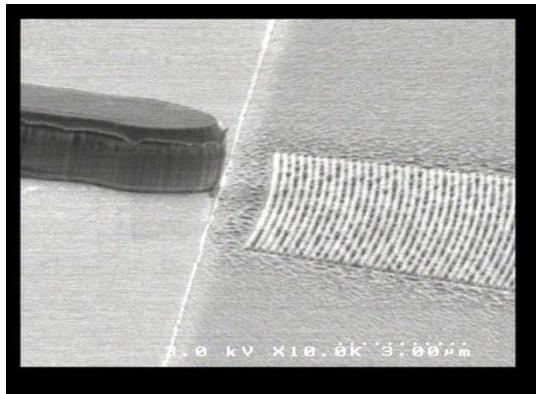


Abbildung 4: REM-Aufnahme eines Wellenleiterstegs mit flach geätztem DBR-Rundgitter als Rückkopplungssegment.

Abbildung 5: Spektren eines DBR-Lasers mit flach geätztem Gitter. Durch Nachbelichten des ORMOCER®s ändert sich die Emissionswellenlänge im Vergleich zum unbelichteten Zustand praktisch nicht.

Um trotz des geringen Brechungsindexhubs des ORMOCER®s ein Abstimmen der Wellenlänge zu ermöglichen, wurde ein alternatives Laserdesign mit einem tief geätzten Rundgitter entwickelt, welches den Überlapp zwischen Lichtmode und ORMOCER® signifikant erhöht (s. Abbildung6).

Im Bereich des Rundgitters wurde ORMOCER® aufgebracht und mittels einer UV-Belichtung von 2,5 s Dauer vorvernetzt. Nach einer Spektrenmessung wurde das ORMOCER® nochmals 70 s lang belichtet. Die vor und nach der 70sekündigen Belichtung aufgenommenen Spektren sind in Abbildung7 dargestellt. Eine Rotverschiebung von 1,1nm wurde beobachtet. Da der Überlapp zwischen Lichtmode und ORMOCER® in den Gitterlücken das theoretische Maximum von 100 % annähernd erreicht, konnte daraus ein Brechungsindexhub im ORMOCER® von $2,7 \cdot 10^{-3}$ ermittelt werden.

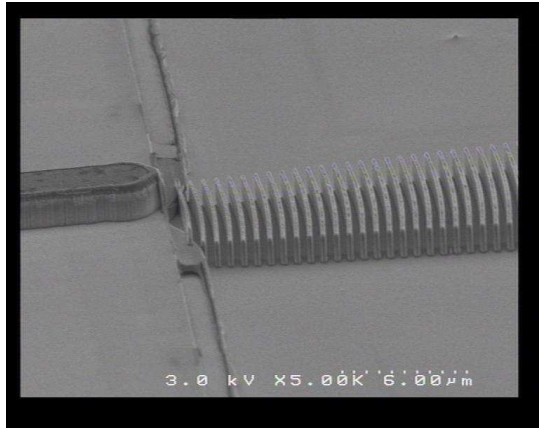


Abbildung 6: REM-Aufnahme eines Wellenleiterstegs mit tief geätztem DBR-Rundgitter.

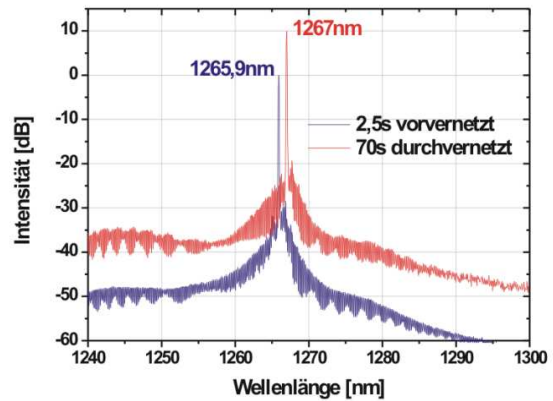


Abbildung 7: Spektren eines DBR-Lasers, dessen Gitter mit 2,5 s vorvernetzt (blau) bzw. 70 s durchvernetzt (rot) ORMOCER® gefüllt ist.

Des Weiteren wurden basierend auf weiteren ORMOCER®en mit größerem Brechungsindexhub mehrere neue DFB-Laser-Konzepte untersucht. Diese Konzepte erlauben einen im Vergleich zu herkömmlichen lateral gekoppelten DFB-Lasern wesentlich höheren Überlapp zwischen Lichtmode und ORMOCER®.

Ein untersuchter Ansatz beruht auf einem tiefgeätztem Bereich in der Mitte der Laserkavität welcher mit ORMOCER® aufgefüllt wird. Da der niedrige Brechungsindex des ORMOCER®s dazu führen würde, dass die Mode in tiefer gelegene, höher brechende Schichten der Laserstruktur ausweicht, wurde ein neues Epitaxiedesign entworfen, welches unterhalb der Wellenleiterschicht eine AlGaAs-Schicht mit sehr hohem Aluminiumanteil aufweist. Es wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich war, diesen Bereich nachträglich zu oxidieren, so dass eine Verdrängung der Lasermode unterbunden werden konnte. Die gewünschten Eigenschaften konnten mit diesem Design nicht vollständig erreicht werden, woraufhin ein weiterentwickelter Ansatz in alternativem Design weiterverfolgt wurde. Mit diesen neuartigen DFB-Strukturen konnte eine monomodige Wellenlängenverschiebung von insgesamt 13 nm @ $\Delta RIU=0,5$ ($RIU = \text{refractive index unit}$; entsprechend 50 % Indexhub zwischen Luft und Polymer als Füllmedium, keine Abstimmbarkeit) erreicht werden.

Daraus lässt sich ein Überlapp zwischen Lichtmode und Polymer von 6,8 % berechnen. Dies stellt einen neuen Rekordwert für den Überlapp zwischen einer in einem Stegwellenleiter geführten Mode und einem umgebenden Material mit niedrigem Brechungsindex dar. So konnten Nolde et al. [2] mit einem nur 1 μm breiten Steg einen Überlapp von 0,28 % erreichen.

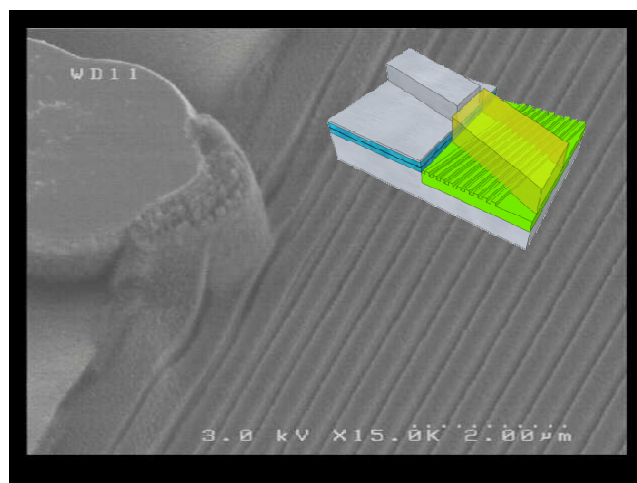


Abbildung 8: Monolithischer SLD-Ansatz mit einem in SiO_2 strukturierten Gitter. Für die Komplettierung des Bauteils und zur finalen Prüfung der Funktionalität ist ein strukturierter ORMOCER®-Stegwellenleiter nötig (s. Schemazeichnung).

Desweiteren wurden DBR-Laser und Superlumineszenz (SLD) -Dioden mit einem für dieses Projekt von nanoplus entwickelten monolithischen bzw. externen SiO_2 -Gitter hergestellt (vgl. Abbildung8). Durch das strukturierte Gitter kann ein schmalbandiges Emissionsspektrum erzielt werden. Die

Implementation eines strukturierten ORMOCER[®]-Stegwellenleiters über dem Gitterbereich sollte detaillierte Aussagen über die Auswirkungen der Brechungsindexänderung in den neuen ORMOCER[®]-Materialien auf die Emissionswellenlänge erlauben. Durchgeführte Simulationen sagen ein anwendungstaugliches Abstimmverhalten der Bauteile voraus. Das Bauelementedesign ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt.

Die entworfenen und hergestellten SLD-basierenden Bauteile konnten leider nicht abschließend qualifiziert werden, da die Definition einer Wellenleiterstruktur geeigneter Dimension basierend auf den verfügbaren ORMOCER[®]-en innerhalb der Projektlaufzeit nicht erfolgreich war.

3.4 Konzeption und Test wellenlängen-einstellbarer optischer Sender für Zugangsnetze (Alcatel-Lucent)

Spezifikation aus Systemsicht

Um die Anforderungen an den zu entwickelnden abstimmbaren Laser präzise formulieren zu können, war es wichtig, die Rahmenbedingungen zu definieren, unter denen ein möglicher Einsatz in optischen Zugangsnetzen stattfinden könnte. Dazu wurde ein Referenzsystem spezifiziert, das die späteren realen Einsatzbedingungen möglichst realistisch beschreiben sollte.

Für dieses Referenzsystem wurde ein reines WDM-PON-System (im Gegensatz zu hybriden TDM/WDM-Varianten) mit 32 Teilnehmern ausgewählt. Dessen Reichweite sollte mindestens 20 km betragen. Die Downstream-(DS)-Wellenlänge sollte im C-Band (um 1550 nm) liegen, die Upstream-(US)-Wellenlänge im O-Band (um 1310 nm). Um 32 WDM-Kanäle bei einem DWDM-Raster von 100 GHz zu überstreichen, benötigt man im O-Band um 1310 nm einen Abstimmbereich von ca. 20 nm, der dann auch die Anforderung an den abstimmbaren Laser darstellte.

Die angestrebten Datenraten sollten im Bereich von mindestens 2,5 Gb/s bis maximal 10 Gb/s bei direkter Modulation des Lasers liegen. Die Laserausgangsleistung sollte zwischen 0 und +7 dBm betragen. Die Wellenlängendrift sollte kleiner als 0,01 nm/K sein, wenn eine externe Kühlung vermieden werden soll.

Um den geforderten Abstimmbereich von 20 nm für den zu entwickelnden Laser zu gewährleisten, ist je nach der Größe des Überlapps von Lasermode und ORMOCER[®] ein Brechzahlhub von ungefähr 1,5 % bis 15 % erforderlich. Sollte das nicht zu erreichen sein, könnte man immer noch das DWDM-Raster auf 50 GHz verringern, wodurch der erforderliche Abstimmbereich auf ca. 10 nm halbiert werden kann, was aber andererseits die benötigte Präzision der Wellenlängeneinstellung erheblich steigern würde.

Steuerelektronik zur Einstellung der Wellenlänge

Um die vorgesehene Wellenlänge im OPTIMISE-Laser einzustellen, muss das ORMOCER[®] im Gitterbereich des DFB-Lasers mit Hilfe einer UV-LED gezielt mit ultraviolettem Licht bestrahlt werden. Dieses Licht wird – basierend auf einer ermittelten Kalibrationskurve – in Form von zeitlich und intensitätsmäßig genau definierten Pulsen abgegeben. Die benötigte „Intelligenz“, um dieses zu bewerkstelligen – ein Mikroprozessor – befindet sich optimalerweise direkt im Transceiver-Modul des ONUs.

Um diesen Prozess auszulösen, wird allerdings eine Information über die einzustellende Wellenlänge benötigt. Die Übertragung dieser Information vom OLT über den optischen Kanal stellt wohl die geeignetste Methode dar. Der OLT im WDM-PON besitzt prinzipiell alle Informationen darüber, welche ONUs bereits angeschlossen sind, welche Wellenlängen damit vergeben bzw. welche noch frei sind.

Allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass der ONU zwar Daten vom OLT empfangen kann, in der Gegenrichtung aber keine Kommunikation möglich ist, da durch das Filter des AWG-Mux/DeMux nur die für diesen Kanal vorgegebene Wellenlänge passieren kann, die aber erst nach der Einstellung zur Verfügung steht. Der OLT bekommt daher zum ersten Mal nach erfolgter Wellenlängeneinstellung eine Rückmeldung vom ONU.

Auf allen noch nicht von ONUs benutzten Wellenlängen sendet der OLT deshalb in regelmäßigen Abständen Datensequenzen, die unter anderem den einzustellenden Wellenlängenwert enthalten. Die Datensequenzen haben aus Gründen der Übertragungssicherheit eine sehr niedrige Datenrate, müssen aber dennoch mit der hohen Brutto-Bitrate des WDM-PON über den normalen Datenkanal übertragen werden.

Auf OLT-Seite werden die Einstelldaten deshalb auf den High-Speed-Datenkanal aufmoduliert. Im ONU liest eine Kontroll-Logik den Datenkanal mit. In dieser Kontroll-Logik werden die Datensequenzen mit der niedrigen Datenrate aus der hohen Bitrate des Übertragungskanals extrahiert und einer Auswerteeinheit zugeführt. Eine Setup-Einheit im ONU kann anschließend den abstimmbaren Laser mit Hilfe eines UV-LED-Treibers auf die vorgegebene Wellenlänge einstellen.

Die Wellenlängeneinstellung ist ein nicht reversibles Verfahren und muss deshalb absolut fehlerfrei und genau zum Durchlassmaximum der AWG-Filter passend durchgeführt werden. Dazu wird eine präzise Kalibrationskurve benötigt, die exakt die Veränderung der Wellenlänge in Abhängigkeit von der Bestrahlung mit UV-Licht beschreibt. Außerdem muss die Startwellenlänge exakt bekannt sein.

Da das mit ziemlicher Sicherheit sehr unwahrscheinliche Annahmen sind, da aufgrund der prozessbedingten Schwankungen eine erhebliche Streuung der Bauelementeparameter zwangsläufig gegeben ist, wird man wohl nicht umhin kommen, die (sich ändernde) Wellenlänge des Lasers permanent zu detektieren und anhand der Messwerte den Einstellprozess zu steuern. Dazu haben wir einen Wellenlängenmonitor entwickelt, der aus einem Kantenfilter mit breitem Übergangsbereich besteht, dessen Reflexions- und Transmissionsparameter ausgewertet werden.

Labor-Testbett

Um die zu entwickelnden abstimmbaren Laser sowie die Wellenlängeneinstellung in einem realitätsnahen System untersuchen zu können, ist ein Labordemonstrator aufgebaut worden (siehe Abbildung 9). Dieser bildet ein reines WDM-PON-System (gemäß dem Referenzsystem) ab, allerdings beschränkt auf 8 WDM-Kanäle.

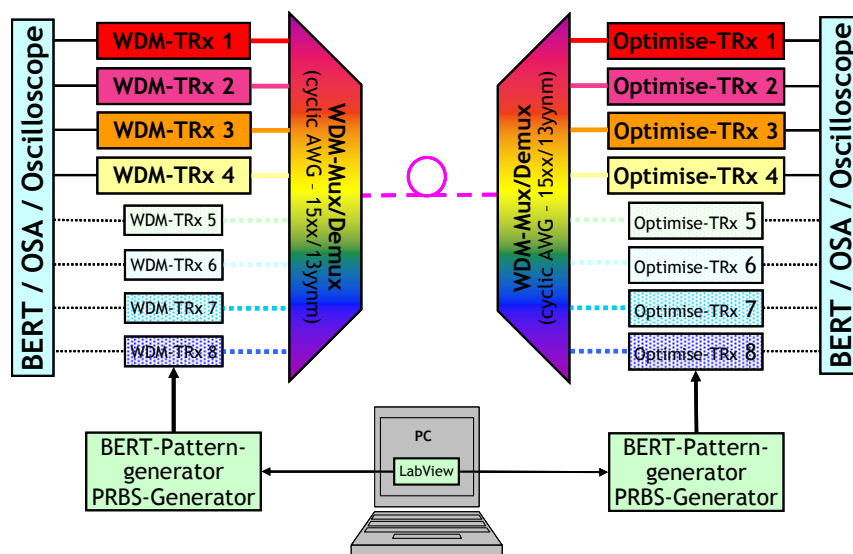


Abbildung 9: Schematischer Aufbau des Labordemonstrators (WDM-PON-System mit 8 Kanälen)

Die Signale mit unterschiedlicher Wellenlänge werden hier mit Hilfe eines WDM-Multiplexers auf einer einzigen Faser zusammengeführt, übertragen und anschließend mit Hilfe eines WDM-Demultiplexers wieder auf die einzelnen Kanäle verteilt. Als Multiplexer kommen zyklische AWGs (arrayed waveguide gratings) zum Einsatz, die für das C-Band (um 1550 nm) spezifiziert sind. Aufgrund der zyklischen Eigenschaften kann über ein und denselben Port auch ein Signal des O-Bandes übertragen werden. Diese Eigenschaft wird im Labordemonstrator ausgenutzt.

Auf der OLT-Seite sind die einzelnen Kanäle mit kommerziell erhältlichen abstimmbaren Lasern bestückt, die im C-Band arbeiten. Die Datenraten können variabel zwischen 1,25 und 10 Gb/s eingestellt werden.

Auf ONT-Seite verwenden wir XFP-Transceiver-Module für das O-Band mit fest eingestellter Wellenlänge, die mit Datenraten bis zu 10 Gb/s bei direkter Modulation arbeiten können. Die Wellenlängenwerte der verschiedenen Module bewegen sich aufgrund der Fabrikationsschwankungen in einem ausreichend großen Wellenlängenbereich, der zwar im Rahmen der Toleranz liegt, es uns aber doch erlaubt, acht DWDM-Kanäle mit je 100 GHz abzudecken.

Mindestens ein Kanal des Laborsystems sollte mit einem der zu entwickelnden abstimmbaren Laser bestückt werden. In diesen Kanal wurde auch die Steuerelektronik für die Wellenlängeneinstellung eingebaut.

Da noch kein derartiger Laser zur Verfügung stand, benutzten wir ein Peltier-Element, um die Wellenlänge des herkömmlichen DFB-Lasers durch Veränderung der Temperatur in gewissem Ausmaß (einige nm) verschieben zu können. Diese Vorgehensweise ermöglichte es uns, die Steuerelektronik samt Einstellungsprotokoll bereits vorab unter realistischen Bedingungen testen zu können. Anstatt eine UV-Leuchtdiode mit Strompulsen anzusteuern, wurde das Peltier-Element angesteuert; die wichtige Kalibrationskurve stellte hier den Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Temperatur her. Alle wesentlichen Einstellprozeduren haben unter diesen Rahmenbedingungen zufriedenstellend funktioniert.

Sobald ein Exemplar des neu entwickelten abstimmbaren Lasers zur Verfügung gestanden hätte, hätten die entsprechenden Steuermodule leicht derart angepasst werden können, dass sie, anstatt ein Peltier-Element zur Temperatureinstellung anzusteuern, dann eine UV-LED gepulst hätten. Auf diese Weise hätte dann die Wellenlänge eingestellt werden können. Leider konnte bis Projektende kein funktionsfähiges Bauelement fertiggestellt werden.

Die gesamte Steuerung des Labordemonstrators als funktionsfähiges WDM-PON-System inklusive der Steuerelektronik zur Wellenlängeneinstellung wird von einem Managementsystem übernommen, das auf der Basis des Programms LabVIEW entwickelt und auf einem Steuerrechner implementiert wurde.

4. Ausblick

Die vielfältige Materialklasse der anorganisch-organischen Hybridpolymere (ORMOCER[®]e) hält noch jede Menge möglicher Kombinationen bereit, die sich für den Einsatz in optisch abstimmbaren Halbleiterlasern eignen. So sind etwa die Styryl-Systeme zu nennen, die eine deutlich langsamere Reaktionskinetik bei UV-Bestrahlung zeigen und damit in dieser Hinsicht auch vielversprechend für die Wellenlängeneinstellung sind. Es ist weiterhin auch offen, ob die obere Grenze des möglichen Brechzahlhubes schon erreicht ist.

Auch in Bezug auf das Laserdesign gibt es noch eine Reihe von vielversprechenden Varianten, die im Rahmen der begrenzten Laufzeit des Vorhabens leider nicht mehr näher untersucht werden konnten.

Auf dem Sektor der kostengünstigen abstimmbaren Lichtquellen für optische Zugangsnetze hat sich bis zum aktuellen Zeitpunkt auch weltweit noch kein wesentlicher Fortschritt abgezeichnet, so dass über WDM-PON-Netze zwar ausgiebig diskutiert wird, aber eine reale Implementierung in der nächsten Zukunft wohl noch nicht zu erwarten ist.

5. Anhang

5.1 Referenzen

- [1] S. M. Wang, G. Adolfsson, H. Zhao, Y. Q. Wei, J. Gustavsson, Q. X. Zhao, M. Sadeghi, A. Larsson, "Growth of GaInNAs and 1.3 μm edge emitting lasers by molecular beam epitaxy", J. Cryst. Growth **311**, pp. 1863-1867 (2009)
- [2] J. A. Nolde, J. W. Raring and L. A. Coldren, "Increased Modal Overlap for Improved Sensitivity in a Monolithic Intracavity Chemical Sensor", IEEE Photon. Technol. Letters 19, 1051 (2007)

5.2 Publikationen

- A. Bock, T. Pieper, R. Houbertz, and G. Sextl, *Proc. SPIE* **7221**, 72210K (2009).
- Vortrag *Photonics West 2010*: A. Bock, R. Houbertz, and G. Sextl, Correlation of the organic cross-linking behavior and optical properties of inorganic-organic hybrid polymers.
- Poster *Hybrid Materials 2009 - First International Conference on Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials Hybrids*: A. Bock, V. Fodermeyer, T. Pieper, M. Timpel, R. Houbertz, and G. Sextl: Inorganic-organic hybrid materials for optical applications.

5.3 Patente

- Wavelength selective element, process for adjusting the refractive index of a wavelength selective element, and optical radiation emitting component (EP 2169788, Offenlegung 31.3.2010, Gemeinschaftspatent Alcatel-Lucent/nanoplus/Uni Würzburg/Fraunhofer ISC/MergeOptics)
- Method for transferring control data, transmission system, transmitter, and receiver (EP 2323293, Offenlegung 18.5.2011, Alcatel-Lucent)
- Method for manufacturing a tunable laser device and corresponding laser device (EP 2337170, Offenlegung 22.6.2011, Alcatel-Lucent)