Abschlussbericht

Miniaturisierte optische Polymer-Bauelemente für die Wellenlängenmultiplex (WDM)-Übertragung in zukünftigen optischen Breitband-Kommunikationssystemen – MiniWDM

Teilvorhaben: Komponentenentwicklung

Zuwendungsempfänger:	*Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.* *Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut* *Bereich Photonische Komponenten*
Förderkennzeichen:	*16IN0595*
Vorhabensbezeichnung:	*Verbundprojekt: Miniaturisierte optische Polymer-Bauelemente für die Wellen-längenmultiplex (WDM)-Übertragung in zukünftigen optischen Breitband-Kommunikationssystemen* *Teilvorhaben: Komponentenentwicklung*
Projekt-Akronym:	*MiniWDM*
Laufzeit:	*01.01.2008 – 31.12.2010*
Berichtszeitraum:	*01.01.2008 – 31.12.2010*
Projekt-Nr.:	*124-HHI – PC - 200 050*
Datum:	*Juli 2011*
Projektleiter:	*N. Keil*

.....gez. i. V. Martin Möhrle .....
Dipl.-Ing. N. Keil
Projektleiter

gez. Norbert Grote.....
Dr. N. Grote
Abteilungsleiter

Inhalt

1. Allgemeines
   1.1. Aufgabenstellung
   1.2. Voraussetzungen
   1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens
   1.4. Wissenschaftlich-technische Ausgangslage
   1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen
   1.6. Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse
   1.7. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises
   1.8. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten
   1.9. Ergebnisverwertung
   1.10. Fortschritt bei anderen Stellen
   1.11. Veröffentlichung der Ergebnisse
2. Zusammenfassende Ergebnisübersicht
3. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse - Details
   3.1. WP1.1: Entwicklung von Dünnschichtfiltern - Substratadaptierung
   3.2. WP2.1: Design Wellenleiter mit integriertem TFF
   3.3. WP2.2: Herstellung und Charakterisierung TFF/Polymer-Wellenleiter
   3.4. WP3: Erprobung neuer Polymermaterialien
   3.5. WP4.1: Passive CWDM-Bauelemente
   3.6. WP4.2: Hybride CWDM-Empfänger
   3.7. WP4.3: Hybride CWDM Sender
   3.8. WP5.1: Herstellung DWDM-Multiplexer
   3.9. WP5.2: Alternatives Konzept DWDM-Multiplexer
   3.10. WP6: Projekt begleitende Maßnahmen
4 Ausblick

1. Allgemeines

1.1. Aufgabenstellung

Eine Schlüsseltechnik für die optische Datenübertragung in Glasfasernetzen ist das so genannte Wellenlängenmultiplex (WDM)-Verfahren, bei dem die optischen Signale auf unterschiedlichen Wellenlängen parallel übertragen werden. Dadurch lässt sich die Übertragungskapazität der Glasfaser in einfacher Weise additiv vervielfachen, ohne die Datenrate pro Kanal erhöhen zu müssen. Die WDM-Technik wird zunehmend in den unteren Netzhierarchien, d. h. von Metronetzen bis hin zu Teilnehmeranschlussnetzen genutzt. Hier besteht ein besonders hoher Bedarf an kostengünstigen optischen Komponenten, insbesondere an wellenlängenselektiven optischen Bauteilen (Filter, (De)multiplexer, Reflektoren u.a.).

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Untersuchung von Schlüsselkomponenten für diese Anwendungen. Als Basistechnologie diente eine Integrationsplattform aus optischen Kunststoffen (Polymere), in denen planare optische Wellenleiter zur Lichtführung hergestellt werden. Deren Herstellung erfolgt mit kostengünstigen, aus der Halbleitertechnik übernommenen Planar-Prozessen. Passive optische Funktionen, namentlich Wellenlängenfilter, wurden mit Dünnschichtfiltern (TTF) realisiert, die als kleine Plättchen hybrid in die Wellenleiter integriert werden. Die Herstellung solcher extrem dünnen Elemente war ein wesentlicher Bestandteil des Gesamtvorhabens MiniWDM und wurde in Kooperation mit dem Projektpartner Laser Zentrum Hannover durchgeführt.

Darüber hinaus ermöglicht die Polymer-Plattform auch die Integration aktiver Bauelemente (Laser und Photodioden) und somit die Realisierung von hybrid-integrierten optischen Sender- und Empfängerkomponenten. Auch hierzu wurden im Projekt grundlegende Arbeiten durchgeführt.

1.2. Voraussetzungen der Vorhabensdurchführung

Das Vorhaben wurde zusammen mit dem Laser Zentrum Hannover (LZH) als gefördertem Projektpartner durchgeführt. Darüber hinaus bestand das Gesamtkonsortium des Vorhabens aus folgenden Unternehmen:

- ADVA Optical Networking AG, Meiningen
- Aifotec Technologies GmbH, Meiningen
- ELBAU GmbH, Berlin
- EPIGAP GmbH, Berlin (im Verlaufe des Vorhabens übernommen von JenOptik AG)
- Fibre Optical Components GmbH, Berlin
- LASEROPTIK GmbH, Garbsen (ab 1.4.2009)
- Luceo Technologies GmbH, Berlin (bis 31.3.2009)
- MergeOptics GmbH, Berlin (bis 20. 11. 2009, ausgeschieden wegen Insolvenz)
- U2t Photonics, Berlin (ab 1.01.2010)
- VERTILAS GmbH, Garching (ab 1.04.2009)

Die aufgeführten Firmen haben sich entsprechend den Vorgaben des InnoNet-Programms mit zusammen 15% an den Projektkosten der beiden öffentlichen Partner FhG-HHI und LZH beteiligt und darüber hinaus eigenfinanzierte Projektarbeiten durchgeführt. Nach Einschätzung des Projektkoordinators entsprachen die Aufwendungen dabei insgesamt mindestens den geforderten 20% des Projektumfangs.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde im Zeitraum vom 1.1.2008 - 31.12.2010 durchgeführt. Bis zum Projektbeginn ergab sich folgender Planungs- und Beantragungsablauf:

- Einreichung Projektskizze 31.1.2007
- Mitteilung Förderempfehlung 3.5.2007
- Einreichung Antrag August 2007
- Bewilligungsbescheid 17.12.2007

Die organisatorische Durchführung des Vorhabens und die Zusammenarbeit unter den Partnern verlief ohne besondere Probleme. Es fanden regelmäßige Arbeitstreffen etwa im Vierteljahresrhythmus statt. Ein Halbzeit-Statusseminar wurde am 27.05.2009 veranstaltet. Während der Durchführungsphase sind die Partner Luceo Technologies wegen Fokussierung auf andere Themen und MergeOptics wegen Insolvenz (s. 1.2) aus dem Konsortialkreis ausgeschieden, als neue Unternehmen traten VERTILAS, u2t Photonics und LASEROPTIK dem Konsortium im Verlaufe der Durchführungsphase bei.

1.4. Wissenschaftlich-technische Ausgangslage

In einem vom Land Berlin geförderten Vorhaben mit regionalen Partnern wurden einige orientierende Vorarbeiten geleistet, die das Potenzial der verfolgten Hybrid-Integrationstechnologie auf Polymerbasis erkennen ließen und den Anstoß zur Beantragung des MiniWDM-Vorhabens gaben, um die Technologie weiter zu entwickeln. Ein Schlüsselmerkmal dieser Technologie ist der Einsatz von besonders dünnen Dünnschichtelementen zur Realisierung von passiv-optischen Funktionalitäten (Filter, Polarisationsbeeinflussung u.a.). Für die Entwicklung und Herstellung solcher Bauteile gab es weder am FhG-HHI noch in Deutschland oder Europa eine entsprechende Expertise. Nur in Japan waren zwei kommerzielle Anbieter bekannt. Tests mit Filtern eines dieser Hersteller zeigten eine nicht ausreichende optische Performance, außerdem wurden nur sehr wenige Filtertypen und diese zu vergleichsweise hohen Preisen angeboten. Zur erfolgreichen Durchführung des Vorhabens und einer späteren Ergebnisverwertung war daher die Bereitschaft des Laser Zentrum Hannover, solche optischen Mini-Bauteile zu entwickeln und sich am Projekt zu beteiligen, eine entscheidende Voraussetzung.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen fand nicht statt, alle wesentlichen Kenntnisse und Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens waren im Projektkonsortium vorhanden.

1.6 Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse

Die Zuwendungen des MiniWDM-Vorhabens wurden ausschließlich zur Durchführung des Vorhabens eingesetzt. Die erzielten Ergebnisse sind in Abschnitt 2 zusammengefasst.

1.7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Mittel wurden weitestgehend entsprechend der Beantragung verwendet:

- Personalkosten (inkl. Gemeinkosten): ca. 685 kEUR = 89%
- Verbrauchsmaterial: ca. 80 kEUR = 10,4%
- Reisekosten: 1,2 kEUR = 0,02%

1.8. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Die Arbeiten wurden entsprechend der ursprünglichen Planung durchgeführt. Die durchgeführten Arbeiten erwiesen sich als notwendig zur Erreichung der Ziele und waren nach unserer Einschätzung, gemessen an den sehr anspruchsvollen und umfangreichen Aufgaben und dem begrenzten Budget, in vollem Umfang angemessen.

1.9. Ergebnisverwertung

Ziel des beantragten Vorhabens war die Entwicklung von Basistechnologien und Demonstrationskomponenten, auf deren Grundlage die beteiligten Firmen zukünftig neue Produkte generieren sollen. Aufgrund der Modularität und Flexibilität der Technologie ist eine vielseitige Anwendbarkeit gegeben. Primäre Anwendungsfelder sind die Glaser faser basierte Tele- und Datenkommunikation sowie die optische Sensorik und Messtechnik.

Die Weiterentwicklung zu Produkten, deren Herstellung und Vermarktung muss natürlich von den am Vorhaben beteiligten Firmen getrieben und übernommen werden. Das HHI wird den Firmen sein Know-how zu nicht-diskriminierenden Konditionen zur Verfügung stellen und kann in einer Markteintrittsphase Prototypserien von erforderlichen Polymer-Chips herstellen. Nach aktueller Einschätzung besteht seitens u2t erhebliches Interesse an der Produktentwicklung von speziellen Empfängerkomponenten für phasenmodulierte optische Übertragungsysteme (sog. (D)QPSK-Empfänger) auf Basis der Polymertechnologie. Die früher favorisierten CWDM-Empfänger sind dagegen eher in den Hintergrund getreten. Das Unternehmen FOC fokussiert sich zurzeit besonders stark auf Filterbausteine für die Überwachung von optischen Teilnehmeranschlussnetzen, sog. OTDR-Reflektoren, wofür die entwickelte Dünnstschichtfiltertechnologie eine entscheidende Produktgrundlage ist. Die Projektpartner Aifotec, Laseroptik und ELBAU verstehen sich als Technologiedienstleister und sind interessiert, vorbehaltlich zu klärender wirtschaftlicher und sonstiger Randbedingungen, Fertigungsaufgaben zu übernehmen. VERTILAS' Projektinteresse beruhte vor allem auf der Anwendung von VCSEL-Lasern in Verbindung mit der entwickelten Technologie für parallel-optische Sender. Hier ist eine Verwertung nur dann erkennbar, wenn noch bestehende grundsätzliche Probleme hinsichtlich der Lichteinkopplung in die monomodalen Polymerwellenleiter gelöst werden können. ADVA als Systemhaus ist prinzipiell interessierter Kunde für eine Reihe möglicher Produkte, sofern diese ihren technischen und preislichen Anforderungen entsprechen und sich neue Marktchancen abzeichnen. Für EPIGAP hat sich nach Übernahme durch JenOptik (jetzt Abteilung von JenOptik Polymer Systems) eine neue Situation ergeben, indem jetzt verstärkt Konzernstrategien zu berücksichtigen sind. Verwertungsabsichten sind weiterhin

denkbar (z.B. auch die Fertigung der Polymer-Chips), falls die Marktvolumina hinreichend groß sind, aber zurzeit nicht absehbar.

Das HHI selbst ist mit der Polymer-Integrationstechnologie an mehreren laufenden öffentlichen Vorhaben (CONDOR, ADVAntage-PON, NGOA (Unteraufrag) (alle BMBF), POLYSYS (EU)) – teilweise zusammen mit Partnern des MiniWDM-Projekts – beteiligt, die eine Weiterentwicklung der Technologie und Anwendung auf bestimmte optische Komponenten ermöglichen. Ein weiterer Projektantrag (PolyBoard) wurde positiv bewertet, liegt aber zurzeit mangels Fördermittel „auf Eis". Mit diesen Projekten treibt dass HHI die Polmertechnologie weiter voran, und es und wird sichergestellt, dass die in MiniWDM erzielten Ergebnisse wissenschaftlich-technisch weiter genutzt werden.

1.10. Fortschritt bei anderen Stellen

Optische Integrationstechnologien stehen heute im Mittelpunkt der weltweiten Entwicklung photonischer Komponenten, nachwievor getrieben durch die optische Kommunikationstechnik. Diese Entwicklungen teilen sich auf in monolithische und hybride Integrationstechniken, die zum Teil in Konkurrenz stehen, sich letztlich aber ergänzen werden, indem eine Kombination beider Techniken verwendet werden wird. Das Vorhaben MiniWDM zielte auf die Hybridintegration und war und ist weiterhin mit seinen Zielsetzungen hochaktuell. Basistechnologien für integrierte photonische Komponenten sind hauptsächlich die InP-Halbleitertechnologie (monolithisch), Silizium-(silicon-on-insulator (SOI)) (monolithisch/hybrid) und Silica (Quarzglas). Insgesamt wurden in den letzten Jahres auf dem Gebiet der photonischen Integration enorme Fortschritte erzielt, auf die im Einzelnen einzugehen den Rahmen dieser Darstellung sprengen würde. Mit der Verwendung von Polymermaterialien als Integrationsplattform verfügt das HHI weitgehend über ein Alleinstellungsmerkmal, sieht man von Entwicklungen in Korea ab. Insbesondere die Verwendung von Dünnstschichtelementen macht die Polymer-Integrationsplattform sehr attraktiv, da hiermit passiv-optische Funktionalitäten in sehr kompakter Form, mit hoher Performance, nahezu temperaturunabhängig und mit hoher Flexibilität realisierbar sind. Während entsprechende Pionierarbeiten vor allem in Korea und zum Teil in Japan Mitte des letzten Jahrzehnts zu einem gewissen Stillstand gekommen sind (nach der veröffentlichten Fachliteratur), deuten jüngere Informationen daraufhin, dass diese Technologie jetzt auch an anderer/n Stelle/n als attraktiv erkannt und in Verbindung mit Silica-Plattformen verfolgt wird.

1.11. Veröffentlichung der Ergebnisse

Ein Teil der erzielten Ergebnisse wurde berichtet im Rahmen eines eingeladenen Vortrags auf der *Optical Fiber Conference 2011 (OFC'11*) in Los Angeles, der größten internationalen wissenschaftlichen Tagung auf dem Gebiet der optischen Kommunikationstechnik:

Norbert Keil, Crispin Zawadzki, Ziyang Zhang, Jin Wang, Nelson Mettbach, Norbert Grote, Martin Schell: *Polymer PLC as an Optical Integration Bench,* Proceedings OFC2011, March 2011, Los Angeles (USA), paper OWM-1

2. Zusammenfassende Ergebnisübersicht

Im Vorhaben wurden zusammengefasst folgende wesentlichen Arbeiten durchgeführt und Ergebnisse erzielt. Die Übersicht entspricht der Strukturierung des Vorhabens in Arbeitspakete (WP), wie im Projektantrag aufgeführt:

WP1.1: Entwicklung von Dünnschichtfiltern

3 Prozess zur Herstellung von Dünnschichtfiltern (TFF) auf Polymersubstrat entwickelt

3.1 Vereinzelungsprozess entwickelt: Sowohl Sägen als auch Laserschneiden möglich

3.2 Laserschneideprozess ergibt geringere Kantenrauigkeit

3.3 Filtergrößen 1mm x 0,5mm, sowie 0,2mm x 0,5mm hergestellt

WP2.1: Design Wellenleiter mit integriertem TFF

4 Wellenleiterparameter für verschiedene Anforderungen und Brechungsindexunterschiede simuliert

4.1 Verluste im Schlitz für 20µm: 1,3dB @ Δn=0.02 / 0,1dB @ Δn=0.006

4.2 Verluste bei Krümmungsradien: R=3mm @ Δn=0.02 / R=20mm @ Δn=0.006

4.3 Faser/Chip Koppeldämpfung < 0,05dB bei Δn = 0,006

WP2.2: Herstellung und Charakterisierung TFF/Polymer-WL

5 Herstellungsprozess entwickelt mit Schlitzen für Dünnschichtfiltern, Nuten für 80µm und 125µm Fasern, sowie 45° Spiegel.

6 Design und Maskenherstellung für verschiedene Multiplexer- und AWG-Strukturen.

7 Verschiedene Filter hergestellt und charakterisiert (Messung zwischen zwei Fasern). Anwendung von angepasstem Substratmaterial und Indexkleber zur Isolationsverbesserung und Verringerung der Rückreflexion. Aufbau und Charakterisierung von Komponenten.

7.1 LWP-1450 Filter: Isolation 30 dB, 10 dB besser als kommerzielle Filter von Central Glass (20dB)
→ 1x2 MUX mit LWP-1450 Filter: Dämpfung :1,5 dB, Isolation: 30 dB

7.2 Triple-Play Filter, Isolation 30 dB
→ 1x2 MUX mit Triple-Play Filter: Dämpfung: 1,5 dB, Isolation 27 dB

7.3 95% Spiegel
→ TAP-Koppler mit 95% Spiegel: Dämpfung: 3,3 dB – 4,2 dB

7.4 OTDR Filter
→ 1x2 MUX mit OTDR Filter: Dämpfung: 1,2 dB, Isolation: -23 dB
→ 1x1 Reflektor mit OTDR Filter: Dämpfung: 0,5 dB, Isolation: -23 dB

7.5 CWDM 1Kanal Filter 1531nm: Dämpfung: ~1dB, Isolation: 10 dB

7.6 CWDM 1Kanal Filter 1551nm: Dämpfung: ~1dB, Isolation: 10 dB

7.7 CWDM 1Kanal Filter 1571nm: Dämpfung: ~1dB, Isolation: 20 dB

7.8 CWDM 1Kanal Filter 1591nm: Dämpfung: ~1dB, Isolation: 15 dB

7.9 CWDM 2Kanal Filter 1531+1551nm: Dämpfung: ~1dB, Isolation: 15 dB

WP3: Erprobung neuer Polymermaterialien

8 CYTOP-Material getestet

8.1 Vorteile: Niedrige Dämpfung, breitbandig

8.2 Nachteile: Schlechte Prozessierbarkeit, Material nicht kommerziell erhältlich
→ Beschluss Konsortium: Keine Weiterverfolgung des Materialsystems CYTOP

WP4.1: Passive CWDM-Bauelemente

9 Layout für 1+4 CWDM Multiplexer entwickelt, Maskensatz hergestellt, PolyBoards hergestellt

9.1 1+4 CWDM MUX (kaskadierte Struktur) mit U-Nuten: 5,5mm x 1,6mm

9.2 1+4 CWDM-MUX (Baum-Struktur) mit U-Nuten: 6,4mm x 1,6mm

10 1+4 CWDM-MUX hergestellt:
10.1 Baum-Stuktur mit 5 CWDM-Filtern und Fasern
10.2 Einfügedämfung: 2,5 dB für Express-Kanal, 8-11 dB für CWDM-Kanäle, Kanalabweichung: < 8 nm.

WP4.2: Hybride CWDM-Empfänger

11 Vertikale Kopplung von planarer Photodiode auf PolyBoard demonstriert
11.1 PolyBoard mit 4-fach Wellenleiter, Faser-U-Nuten und 45°-Spiegel entwickelt und hergestellt
11.2 Hybrider Aufbau mit 4-fach Dioden-Array demonstriert
11.3 Gesamtdämpfung Faser → PolyBoard → 45°-Spiegel → PD = 1,8 - 2,8 dB (PD-Größe: 22µm)
11.4 Isolation besser als 28 dB
12 Layout für 4-Kanal CWDM Empfänger entwickelt, Maskensatz hergestellt, PolyBoards hergestellt
12.1 4-Kanal CWDM Rx (kaskadierte Struktur) mit U-Nuten und 45° Spiegel: 5,0mm x 1,6mm
12.2 4-Kanal CWDM Rx (Baum-Struktur) mit U-Nuten und 45° Spiegel: 5,0mm x 1,6mm
13 4-Kanal CWDM-Empfänger aufgebaut
13.1 mit 4 Stück CWDM Filterelementen, zwei Stück 2-Kanal Photodioden und Faserpigtail
13.2 Responsivität 0,2 A/W bei 3 Kanälen, 0,08 A/W bei 1 Kanal entspricht Dämpfung von 7 dB / 11 dB
13.3 Kanalabweichung: 0 bis 7nm

WP4.3: Hybride CWDM-Sender

14 Vertikale Kopplung von VCSEL auf PolyBoard demonstriert (mit Vertilas)
14.1 Entwicklung VCSEL Chips und Linsensubmount (Vertilas)
14.2 PolyBoard mit 4-fach Wellenleiter, Faser-U-Nuten und 45°-Spiegel entwickelt und hergestellt
14.3 Gesamtdämpfung VCSEL → Linsen-Submount → 45°-Spiegel → PolyBoard → Faser = 3 dB
15 Layout für 4-Kanal CWDM Sender entwickelt, Maskensatz hergestellt, PolyBoards hergestellt
15.1 4-Kanal CWDM Tx (kaskadierte Struktur) mit U-Nuten und 45° Spiegel: 6,5mm x 2,2mm
15.2 4-Kanal CWDM Tx (Baum-Struktur) mit U-Nuten und 45° Spiegel: 6,5mm x 12,2mm

WP5.1: Herstellung DWDM-Multiplexer

16 Stirnflächenkopplung von Laser (CSDFB) mit PolyBoard demonstriert
16.1 PolyBoard zur Stirnflächenkopplung von CSDFB-Laser entwickelt und hergestellt
16.2 Charakterisierung CSDFB-Laser → PolyBoard → Faser
16.3 16mW optische Leistung in der Faser bei 100 mA Laserstrom
16.4 Seitenmodenunterdrückung (SMSR) >40 dB
17 25 GHz und 50 GHz AWG simuliert, Design entwickelt, Maske hergestellt, PolyBoards hergestellt
17.1 25 GHz AWG-Chip: Dämpfung 8,7 dB, Nebensprechen 15 dB
17.2 50 GHz AWG-Chip: Dämpfung 7,3 dB, Nebensprechen 10 dB
17.3 Grenzen der Technologie fast erreicht
18 100 GHz AWG simuliert, Design entwickelt, Maske hergestellt, PolyBoards hergestellt
18.1 Dämpfung 7,2 dB, Nebensprechen 25 dB
19 DWDM-Sender beispielhaft an einer Wellenlänge demonstriert
19.1 100 GHz AWG + DWDM-Laser stirnflächengekoppelt.
19.2 Ausgangsleistung 2 mW bei 50 mA Laserstrom, entspricht 4 dB Zusatzdämpfung für AWG

WP5.2: Alternatives Konzept DWDM-Multiplexer

20 Gegenüberstellung AWG und TFF-MUX: Sinnvoller Einsatz bei DWDM nur AWG

WP6: Projekt begleitende Maßnahmen

21 Durchführung regelmäßiger Arbeitstreffen aller Projektpartner

22 kontinuierliches Benchmarking der technischen Entwicklung, Marktentwicklungen und Patentsituation

23 Beteiligung an Standardisierungsaktivitäten (Ergebnisse u.a. in Spezifikationen für die 1x2 und 1x5 Multiplexer eingeflossen)

3 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse - Details

3.1 WP1.1: Entwicklung von Dünnschichtfiltern - Substratadaptierung

In enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner LZH wurde ein Herstellungsprozess für Dünnschichtfilterelemente (TFF) auf Polymerfolien entwickelt. Für den Vereinzelungsprozess kommen zwei Verfahren in die engere Wahl: Sägen und Laserschneiden.

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Herstellungsprozess und das Zerteilen mittels Chipsäge. Hierbei wird zunächst auf einem Silizium-Substrat die Polymerträgerschicht aufgebracht und dann die TFF-Beschichtung durchgeführt. Zum Vereinzeln wird der Wafer mit der TFF-Beschichtung auf einer Klebefolie fixiert und dann von der Rückseite her mit einer Chipsäge zerteilt. Anschließend werden die Silizium-Stücke von der TFF-Beschichtung entfernt, so dass die einzelnen TFF-Elemente von der Klebefolie abgehoben und in die Komponenten eingesetzt werden können.

Bild 2 zeigt den alternativen Laserteilprozess. Hier werden die Elemente nach Aufbringen der TFF-Schichten zuerst mittels Laserstrahl zerteilt und anschließend auf die Klebefolie übertragen. Der Silizium-Wafer wird im Ganzen abgehoben.

Bild 3 zeigt Ausschnittsweise Fotos der TFF-Herstellung.

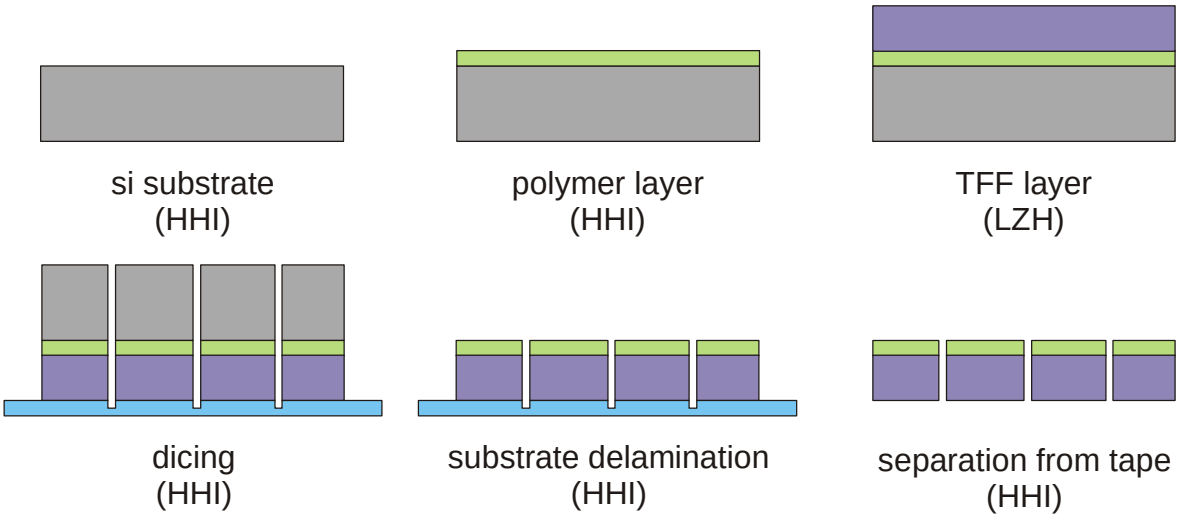


Bild 1: Herstellungsprozess Dünnschichtfilter, Chipsägeprozess (schematische Darstellung).

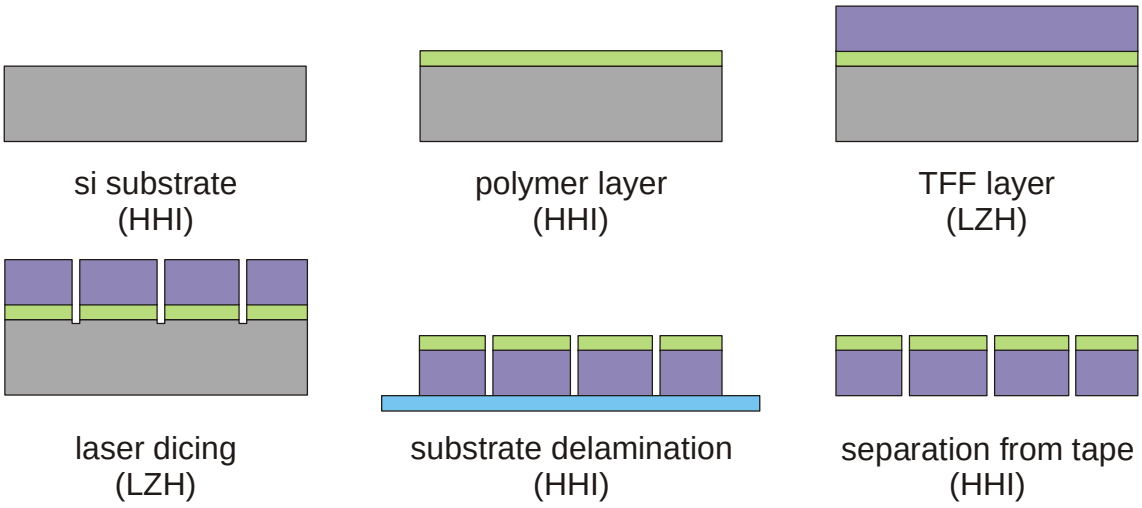
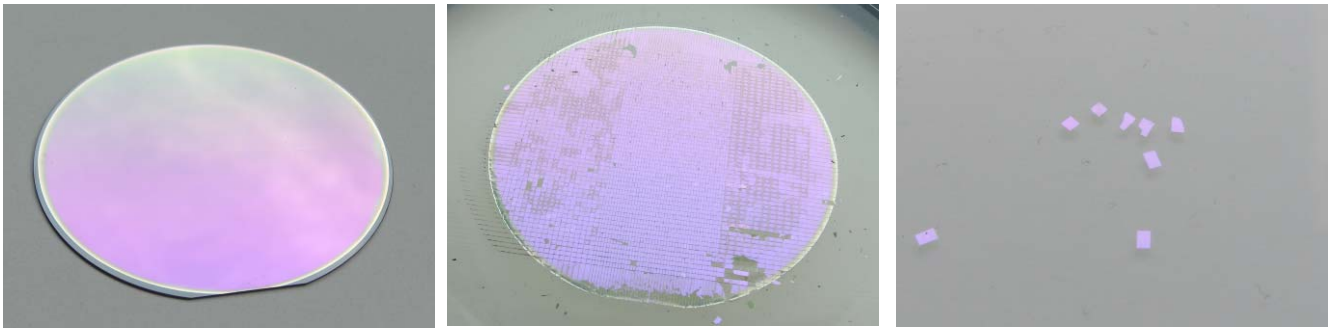


Bild 2: Herstellungsprozess Dünnschichtfilter, Laserschneiden (schematische Darstellung).



a) TFF-Schicht auf Opfersubstrat; b) TFF-Schicht zersägt auf Klebefolie; c) TFF-Elemente „ready-to-use".

Bild 3: Herstellungsprozess Dünnschichtfilter (Ausschnitt).

Die Kanten der zerteilten TFF-Elemente sind beim Laserprozess mit geeignetem Laser und Schnittparametern sehr viel glatter und dünner als die TFF-Elemente, die mit der Chipsäge zerteilt wurden, wie aus Bild 4 und Bild 5 hervorgeht. Allerdings ist die Wahl des geeigneten Lasers und der Laserparameter abhängig von der TFF-Beschichtung und muss für jeden TFF-Typen individuell angepasst und optimiert werden.

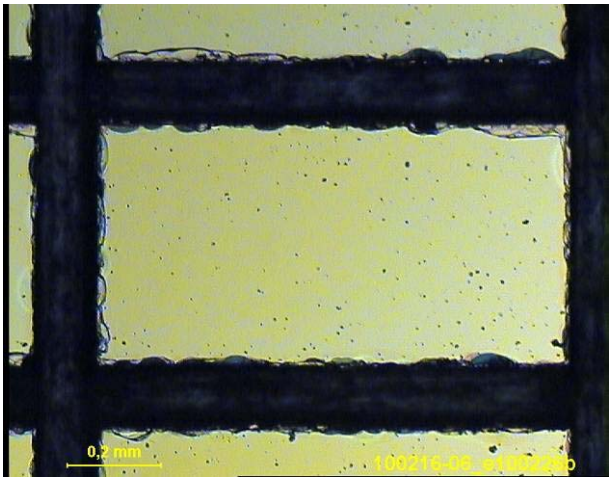


Bild 4: TFF-Elemente gesägt (0,5mm x 1mm).

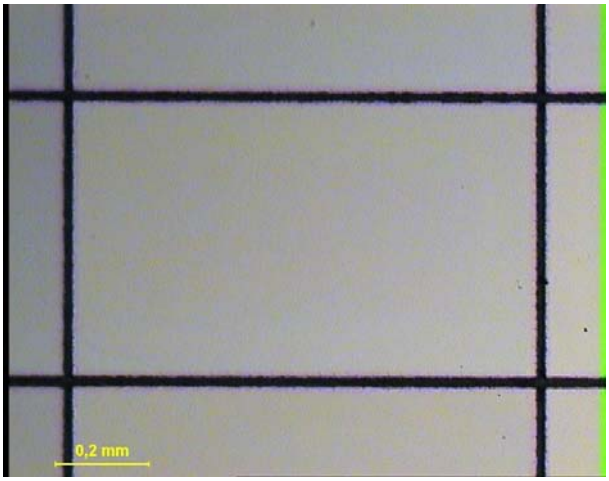
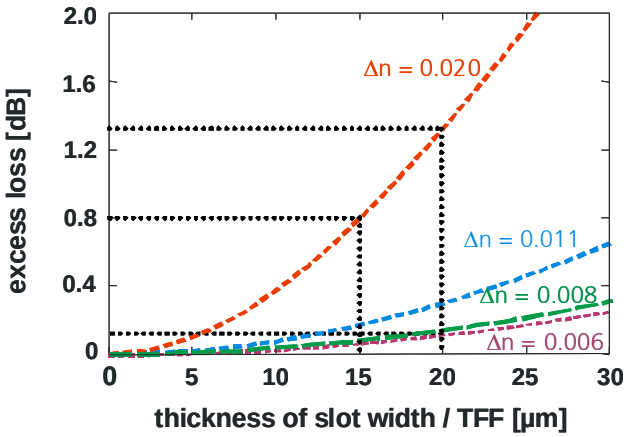


Bild 5: TFF-Elemente Laser geschnitten (0,5mm x 1mm).

3.2 WP2.1: Design Wellenleiter mit integriertem TFF

Abhängig von der Art der Komponente, die hergestellt werden soll, muss ein geeigneter Brechungsindexkontrast gewählt werden. Bei dem am HHI verwendeten Materialsystem kann ein Brechungsindexkontrast zwischen 0 und maximal 0,02 eingestellt werden. Der absolute Brechungsindex liegt zwischen 1,45 und 1,47 bei 1550nm Wellenlänge. Der Brechungsindexkontrast wirkt sich u. a. auf den maximal möglichen Wellenleiterquerschnitt, die Koppeldämpfung zwischen Glasfaser und Polymerchip, die Koppeldämpfung zwischen Laserdiode und Polymerchip, die Dämpfung innerhalb des TFF-Schlitzes (Bild 6) sowie auf den minimal möglichen Krümmungsradius (Bild 7) aus. Aus der Vielzahl der Parameter muss letztendlich der beste Kompromiss gefunden werden, der je nach Komponente unterschiedlich ausfallen kann.



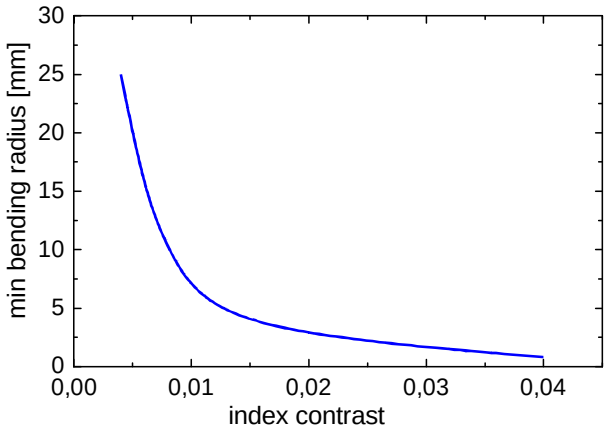
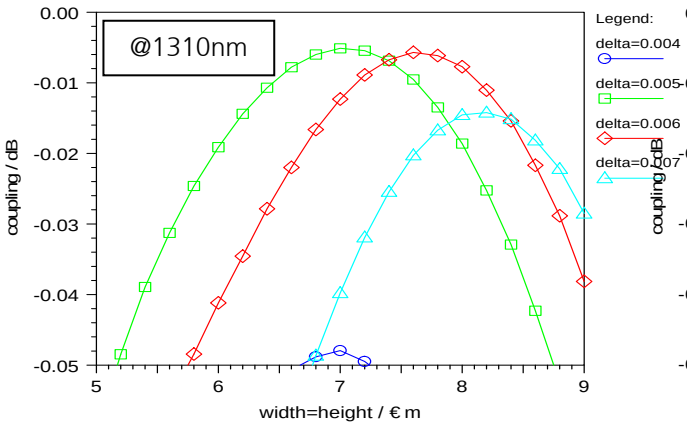


Bild 6: Dämpfung vs. Schlitzweite (Parameter Indexkontrast). *Bild 7: Minimaler Krümmungsradius vs. Indexkontrast.*

Beim Design des 1x2 Multiplexers konnte beispielsweise auf jegliche Wellenleiter-Krümmung verzichtet werden. Hier wurde ein Brechungsindexkontrast von 0,006 gewählt, was sowohl eine niedrige Schlitzdämpfung, als auch eine gute Faserankopplung mit geringer Koppeldämpfung verspricht. Der optimale Wellenleiterquerschnitt wurde zu 5,8µm x 5,8µm bestimmt, um über ein möglichst weites Wellenlängenband (1250-1650nm) einmodig bleiben zu können. Um die Rückreflexionen an dem Dünnschichtfilterelement zu minimieren, wurde ein Einstrahlwinkel von 8° gewählt.

Im Verlauf des Projektes wurde eine weitere Optimierung vorgenommen, um die Koppeldämpfung zur Glasfaser weiter zu minimieren. Bild 8 und 9 zeigen die simulierten Koppelverluste bei 1310nm und 1550nm. Bei einem Brechungsindexkontrast von 0,005 und einem Wellenleiterquerschnitt knapp unterhalb der Multimodigkeitsgrenze von 7,0µmx 7,0µm kann die Koppeldämpfung von < 0,05 dB (@Δn = 0,006) auf < 0,01 dB pro Koppelstelle noch geringfügig verbessert werden.

Bei anderen Komponenten, die viele Krümmungen benötigen wie z.B. AWGs, wird ein höherer Brechungsindexkontrast von 0,020 gewählt. Damit kann der Radius auf 3mm und somit die Chipfläche drastisch reduziert werden.



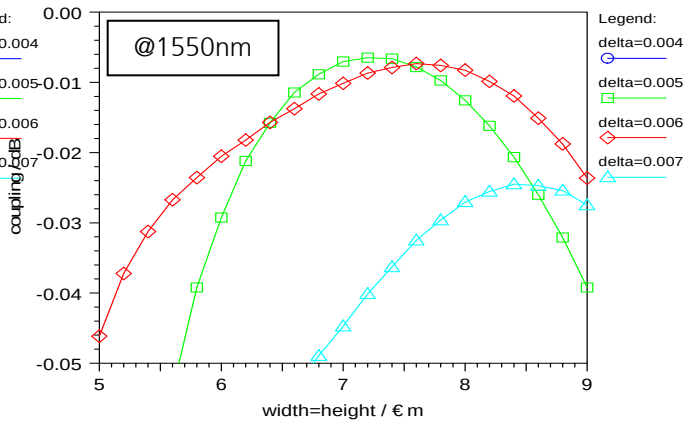


Bild 8: Koppeldämpfung Poly WG – SM-Faser(1310nm) *Bild 9: Koppeldämpfung Poly WG – SM-Faser(1550nm)*

3.3 WP2.2: Herstellung und Charakterisierung TFF/Polymer-Wellenleiter

Herstellung Polymerwellenleiter

Die Herstellung der Polymer-basierten PLCs (planar ligthwave circuits) erfolgt nach dem in Bild 10 gezeigtem Verfahren: Hierbei wird das zunächst flüssige Polymermaterial auf einen schnell rotierenden Wafer aufgebracht. Die Viskosität und die Drehgeschwindigkeit bestimmen die Schichtdicke der Schicht, die auf <±0,2µm genau eingestellt werden kann. Die dünne Schicht wird durch Temperatur bzw. UV-Licht gehärtet, so dass danach die wellenführende Kern-Schicht mit höherem Brechungsindex aufgebracht werden kann. Diese wird mittels einer Quarzmaske, Photolithografiepozess und Reaktiven Ionen Ätzen (RIE) strukturiert, so dass die gewünschte Wellenleitergeometrie entsteht. Abschließend wird eine weitere Passivierungsschicht aufgebracht und gehärtet.

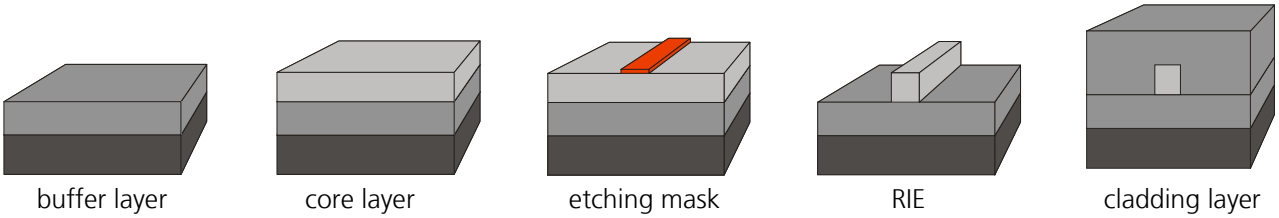


Bild 10: Herstellungsprozess Polymer-PLC.

Dieser Basisprozess kann um weitere Prozessschritte ergänzt werden, um beispielsweise U-Nuten für die Faser/Chip-Kopplung, dünne Schlitze für Dünnschichtelemente oder Spiegelelemente zur vertikalen Auskopplung von Licht zu applizieren.

Die Schlitze für Dünnschichtfilter können entweder mit einer Chipsäge gefräst oder mittels RIE-Prozess geätzt werden. Die gefrästen Schlitze sind sehr viel kostengünstiger herzustellen, sind jedoch nur begrenzt einsetzbar. So ist z. B. die Schlitzbreite nur recht grob einstellbar, da die Breite durch das Sägeblatt definiert wird. Die minimale Breite beträgt ca. 15µm. Weiterhin sind keine örtlich begrenzten Schlitze realisierbar. Der Sägeschlitz wird vielmehr über den gesamten Wafer gezogen, so dass kein Wellenleiter an dem Schlitz vorbeigeführt werden kann. Hier liegt ein eindeutiger Vorteil bei den geätzten Schlitzen. Bild 11 zeigt das Layout eines Polymer-Chips mit U-Nuten zur passiven Faser/Chip-Kopplung und mit einem geätzten Schlitz zur Aufnahme eines Dünnschichtfilters.

Es wurden sowohl Versuche an gesägten, als auch an geätzten Schlitzen durchgeführt. Ein prinzipieller Qualitätsunterschied konnte nicht beobachtet werden.

Bild 12: zeigt einen entsprechend hergestellten Chip mit integrierten Wellenleitern, U-Nuten für die Faserankopplung, sowie geätzten Schlitzen für die Aufnahme der TFF Elemente.

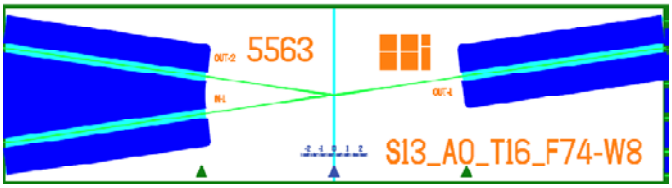


Bild 11: 1x2 Multiplexer, Masken-Layout (5,0mm x 1,3mm). *Bild 12: 1x2 Multiplexer, Foto PolyBoard.*

Als Filterelemente wurden verschiedene Typen getestet. Dazu gehörten sowohl kommerzielle Dünnschichtfilter, als auch in Zusammenarbeit mit dem LZH selbst entwickelte und hergestellte Filterelemente. Die Filter wurden zum einen freistehend charakterisiert, zum anderen in die Polymer-Chips eingebracht vermessen.

Die Montage der ca. 1mm x 0,5mm großen Filterscheiben lässt sich mit geringem Aufwand und etwas Übung mittels Pinzette durchführen. Die Fixierung erfolgt mit UV-Kleber. In Bild 13 ist ein fertiges mit Fasern und TFF-Element bestücktes Bauelement gezeigt.

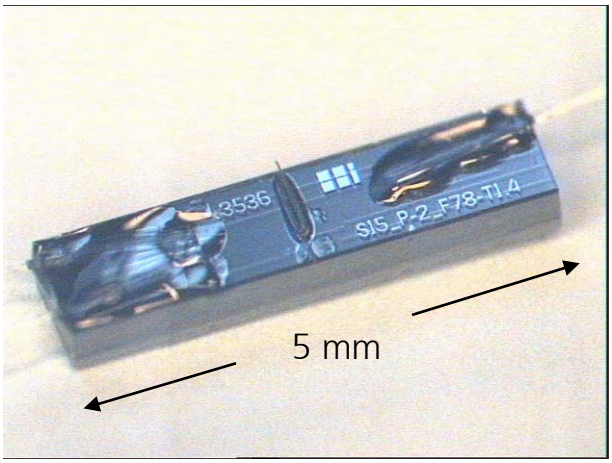


Bild 13: Mit Fasern und TFF fertig bestücktes Bauelement.

Herstellung und Charakterisierung TFF-Elemente

In enger arbeitsteiliger Zusammenarbeit mit dem LZH wurden verschiedene Filter-Elemente hergestellt, die sowohl freistehend, als auch in den Komponenten eingebaut getestet wurden. Bei der Auswahl der TFF Typen wurde auf die Wünsche der Industrieprojektpartner, insbesondere auf die FOC-GmbH eingegangen, um deren Produktideen zu untersuchen. Mehr als 30 TFF-Wafer wurden innerhalb des Projektes hergestellt, die sich in folgende Gruppen aufgliedern lassen:

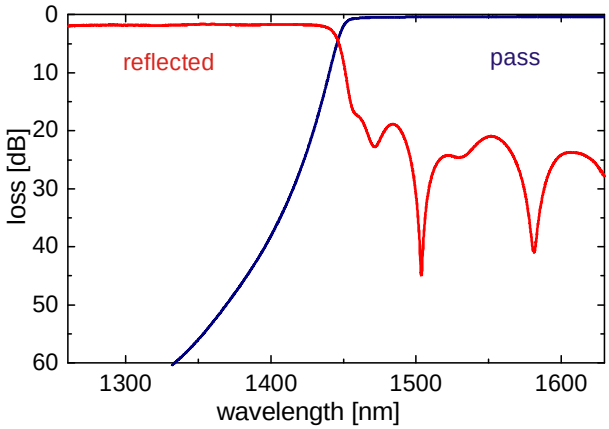
24	Kantenfilter:	Trennung von 1300nm und 1490nm
25	Tripleplayfilter:	Trennung von 1490nm und 1550nm
26	95% Spiegel:	Umlenkspiegel mit 95% Reflektivität bei 1450nm – 1650nm
27	OTDR Filter:	Netzabschluß für OTDR-Komponenten
28	CWDM 1ch Filter:	Bandpassfilter für verschiedene Wellenlängen 1531 / 1551 / 1571 / 1591nm
29	CWDM 2ch Filter:	Bandpassfilter für verschiedene Wellenlängen 1531 + 1551nm

Zu Beginn des Projektes wurde mit dem Materialsystem Tantaloxid (Ta_2O_5) und Siliziumoxid (SiO_2) gearbeitet. Im Laufe des Projektes wurde auf Titanoxid (TiO_2) und Siliziumoxid (SiO_2) umgeschwenkt, da sich einige Vorteile ergeben:

a) Der höhere Brechungsindexunterschied von Titanoxid zu Siliziumoxid führt zu dünneren TFF-Gesamtschichtdicken.
b) Der Ausdehnungskoeffizient zwischen den Materialien ist besser angepasst, was zu niedrigeren Spannungen führt.

Kantenfilter wurden sowohl in eigener Entwicklung hergestellt, als auch kommerziell aus Japan bezogen. Die Charakterisierung dieser Dünnschichtfilterelemente ergab, dass die von den Projektpartnern HHI und LZH hergestellten Filterelemente sehr viel bessere Eigenschaften aufweisen, als die kommerziell erhältlichen. Bild 14 zeigt die Filterkurve eines freistehenden kommerziellen Hochpassfilter und im Vergleich dazu ein von HHI/LZH hergestelltes Filterelement (Bild 15). Sowohl die Flankensteilheit, als auch das Nebensprechen im reflektierten Kanal ist bei den Filtern der Projektpartner wesentlich besser. Das Nebensprechen der MiniWDM-Filter liegt mit -33dB deutlich unter den Werten (-20dB) des kommerziellen Filters der Firma Central Glass (CG).

Damit wurde den Auflagen des Projektträgers Rechnung getragen, nach der Projekthalbzeit die internationale Konkurrenz zu erreichen, bzw. sogar zu übertreffen.



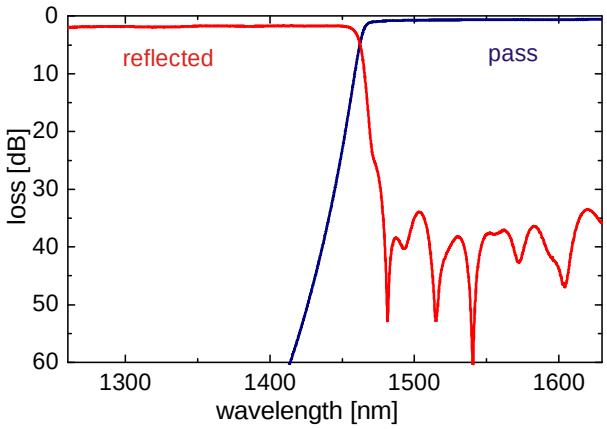


Bild 14: Kommerzielles Hochpassfilter (Central Glass, Japan). *Bild 15: Eigenentwicklung Hochpassfilter (HHI-LZH).*

Die bessere Performance liegt zum einen an der besser adaptierten dielektrischen Schichtenfolge des TFF, zum anderen an dem besser angepassten Substratmaterial der MiniWDM-Filter. Die Bilder 16 und 17 verdeutlichen schematisch den unterschiedlichen Aufbau der TFF-Elemente im Polymer-Chip. Jeder Materialunterschied bedeutet einen Brechungsindexsprung, (andere Farbe) der möglichst gering gehalten werden muss, um eine ungewünschte Rückreflexion bzw. Nebensprechen zu minimieren. Bei den kommerziellen Filterelementen hat das Substratmaterial einen Brechungsindex von 1,53 und ist somit nur ungenügend an das Polymermaterial mit 1,46 angepasst. Auch sind die kommerziellen UV-Kleber mit 1,50 nicht optimal an den Brechungsindex des Wellenleitermaterials angepasst und führen somit zu relativ schlechten Nebensprechwerten in der Rückreflexion (vergl. Bild 16).

Gemeinsam mit dem LZH ist es gelungen, Dünnschichtfilter auf einem angepassten Substratmaterial herzustellen, indem das Wellenleitermaterial selbst als Substratmaterial verwendet wird. Weiterhin konnte dieses Material auch als indexangepasster UV-Kleber eingesetzt werden (Bild 17). Beides führte dazu, dass das Nebensprechen der ins Bauelement eingesetzten Filterelemente im reflektierten Kanal deutlich verringert werden kann, wie in Bild 18 und 19 anschaulich dargestellt ist.

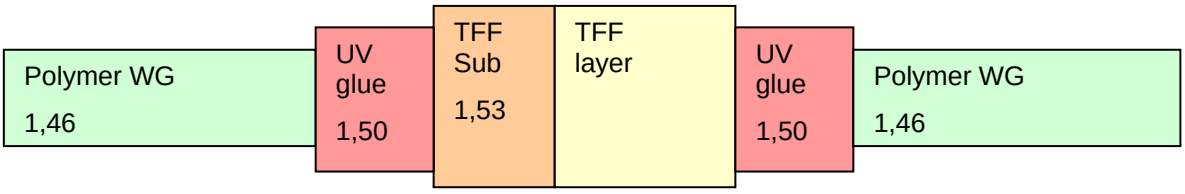


Bild 16: Brechungsindexverlauf: Kommerzieller Dünnschichtfilter (CG, Japan) in Polymerwellenleiter mit UV-Kleber.

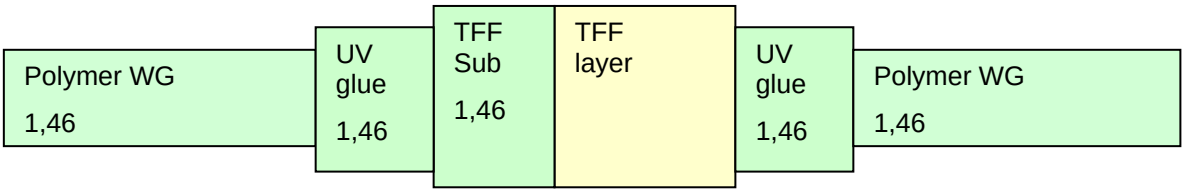


Bild 17: Angepasster Brechungsindexverlauf: Eigenentwickelter Dünnschichtfilter (MiniWDM) in Polymerwellenleiter.

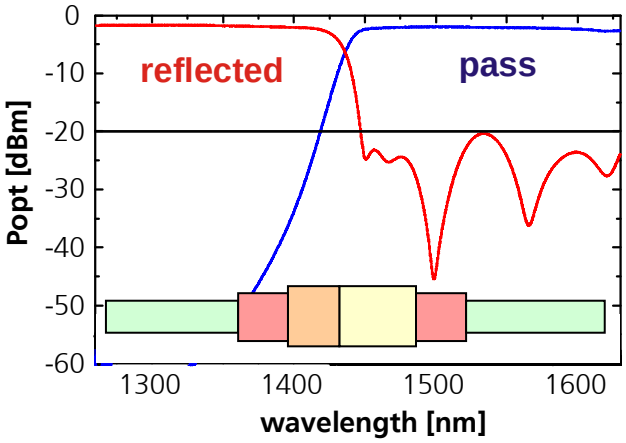


Bild 18: 1x2 MUX mit kommerziellem TFF (CG, Japan).

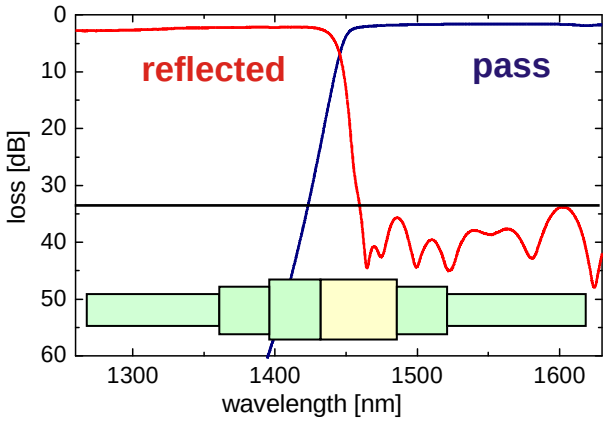


Bild 19: 1x2 MUX mit MiniWDM-TFF (HHI/LZH).

Die Bilder 20 und 21 zeigen Filterelemente und Filterkurve eines TriplePlay-Filters. Dieser Filtertyp soll den Kanal um 1550 nm von den beiden anderen Kanälen 1490 nm und 1310 nm trennen. Es wird eine Isolation von besser 30 dB erreicht. Bild 22 zeigt einen 1x2 MUX, der mit einem TriplePlay-Filter bestückt ist. Die Filterkurve des Multiplexers ist in Bild 23 dargestellt. Die Einfügedämpfung liegt bei diesem Chip bei 1,5 dB und die Isolation bei 27 dB.

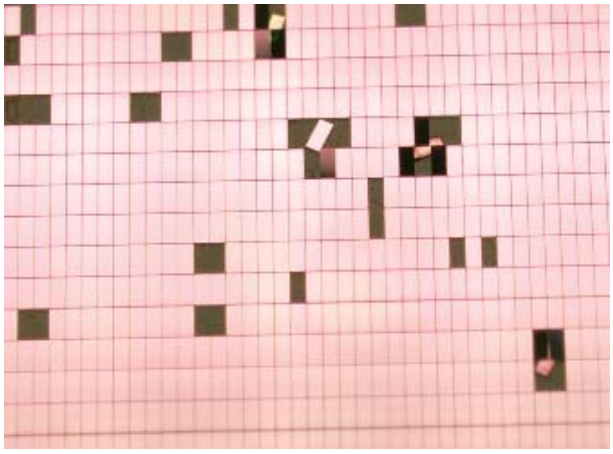


Bild 20: TriplePlay-Filter, TFF auf Klebefolie.

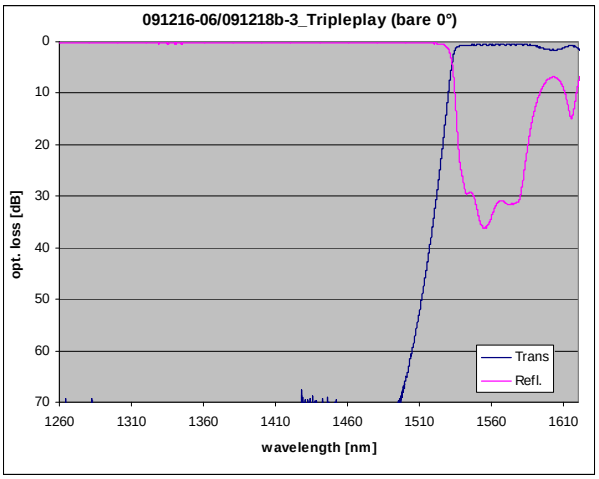
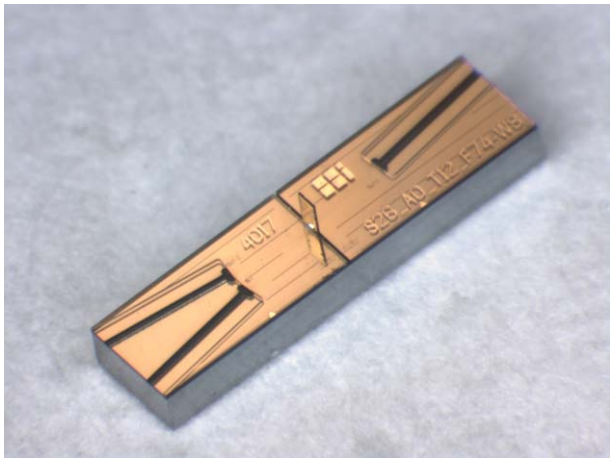


Bild 21: TriplePlay-Filter, Filterkurve (nur TFF, 0°).



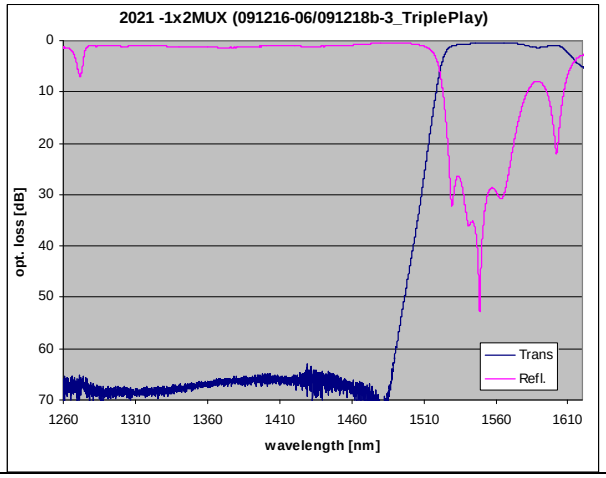
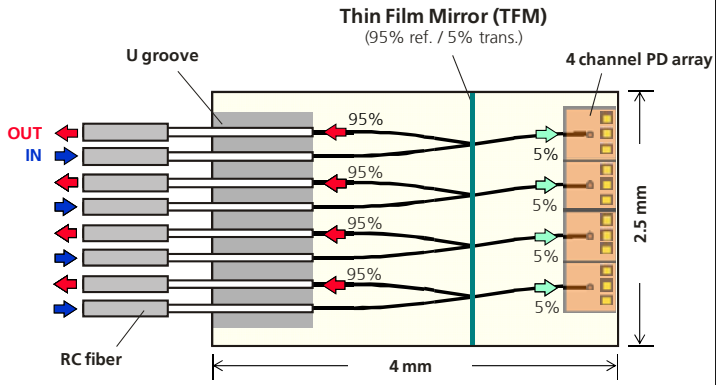


Bild 22: 1x2 MUX mit TriplePlay-Filter. *Bild 23: 1x2 MUX, TriplePlay-Filter, Filterkurve (8°).*

Das Dünnschichtelement eines 95% Spiegels kommt im Tap-Koppler zur Überwachung der optischen Leistung zum Einsatz. Bild 24 zeigt das schematische Layout eines Tap-Kopplers. Die gemessene Filterkurve des TFF-Elements ist in Bild 25 gezeigt.

Ein entsprechender Polymerchip wurde am HHI entworfen und hergestellt. Bild 26: zeigt den mit Fasern und TFF versehenen Chip. Die in Bild 27 dargestellten Dämpfungsverläufe zeigen eine Dämpfung von 3,3 bis 4,2 dB.



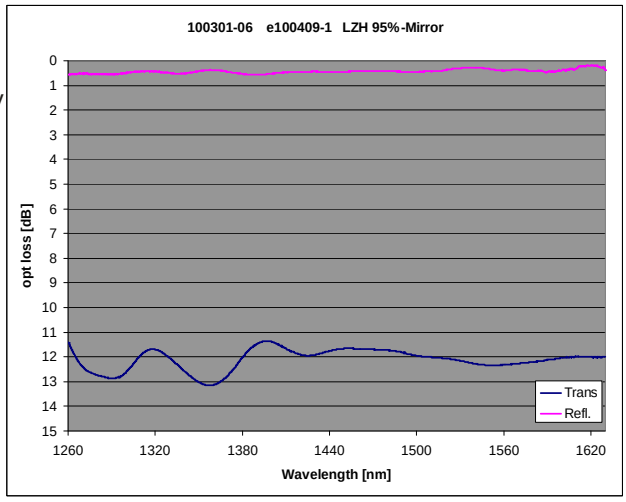
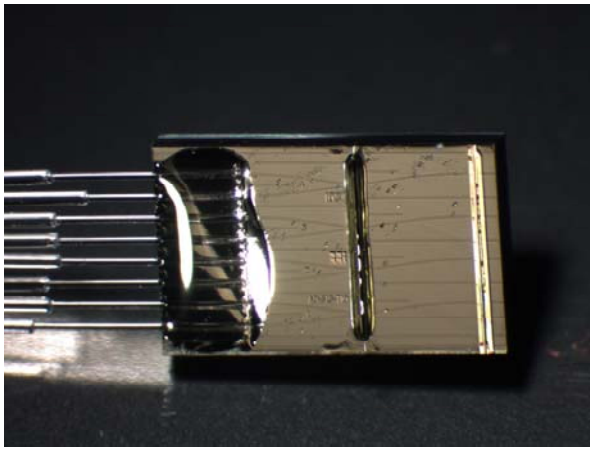


Bild 24: Anwendungsbeispiel 95% Spiegel für Tap-Koppler *Bild 25: Filterkurve95% Spiegel*



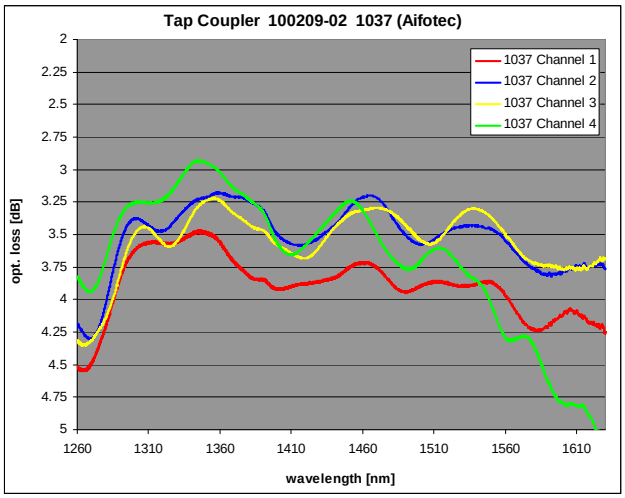


Bild 26: Tap-Koppler mit 95% Spiegel *Bild 27: Messergebnisse 4 Kanal Tap-Koppler*

OTDR Komponenten sind eine weitere Anwendung von TFF-Elementen. Mit diesen ist es möglich, einen Netzabschluss herzustellen, der eine Testwellenlänge bei 1625nm bzw. 1650nm reflektiert, die Signalwellenlängen hingegen ungehindert passieren lässt. Bild 28 zeigt den schematischen Aufbau eines 1x2 Multiplexers, der für das Einschleifen der OTDR-Wellenlänge in der Sendezentrale dient. Der 1x1 OTDR-Reflektor (Bild 29) ist der Netzabschluss, der beim Teilnehmer eingebaut wird. Diese Komponente wurde von FOC sehr stark priorisiert, da sich FOC hiermit den schnellsten Markteinstieg verspricht.

Bild 30 und 31 zeigen die aufgebauten 1x2 und 1x1 Komponenten. In Bild 32 und 33 sind die dazugehörigen Messergebnisse dargestellt. Für den 1x2 OTDR Multiplexer wurden im Bestfall 1,2 dB Einfügedämpfung und -23 dB Return Loss gemessen. Der 1x1 OTDR-Reflektor benötigt nur 0,5 dB Einfügedämpfung im Bestfall bei gleichem Return Loss von -23 dB.

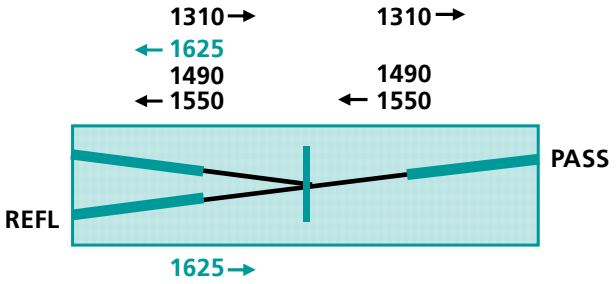


Bild 28: OTDR-WDM, Layout

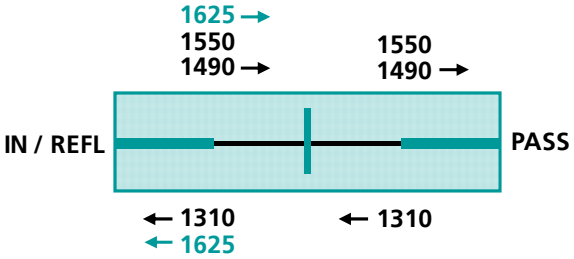


Bild 29: OTDR-Reflektor, Layout

Bild 30: OTDR-WDM, Chip

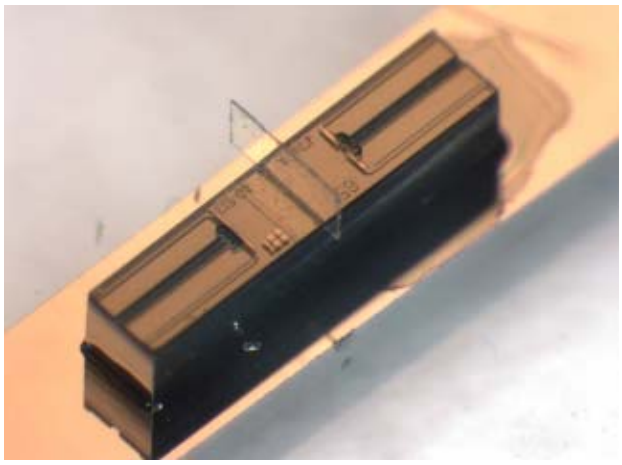
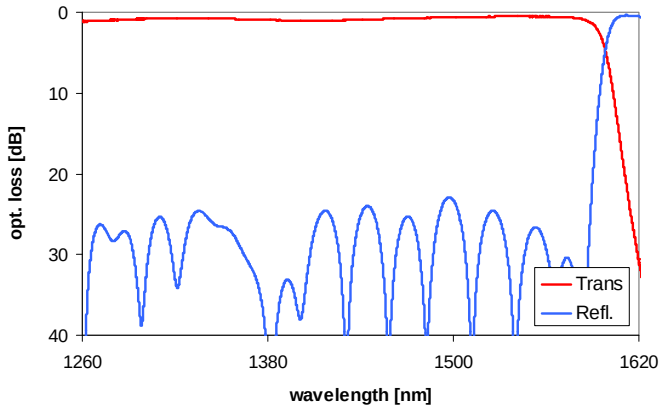


Bild 31: OTDR-Reflektor, Chip



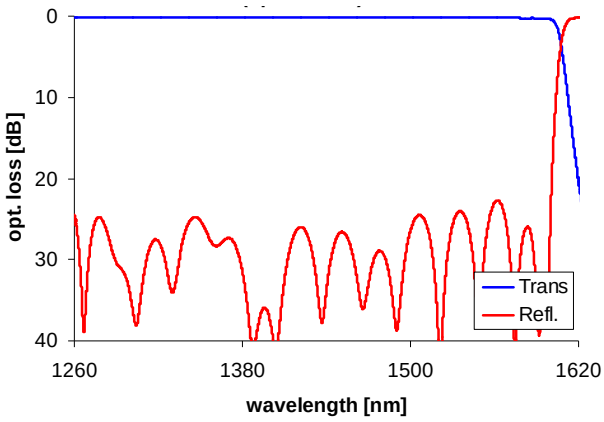
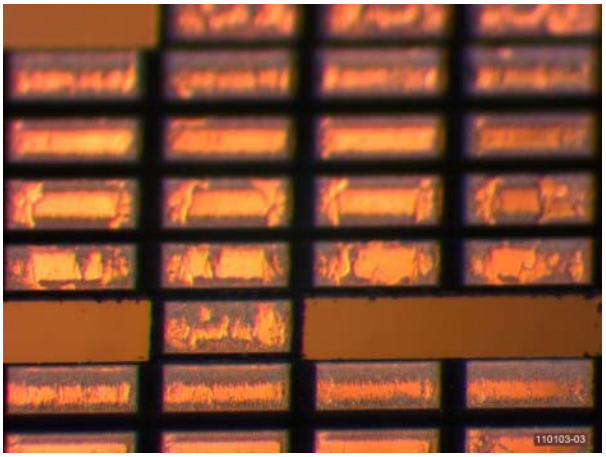


Bild 32: OTDR-WDM, Messergebnis *Bild 33: OTDR-Reflektor, Messergebnis*

CWDM Filter werden für Mehrkanalmultiplexer verwendet, sowie für CWDM-Sender und -Empfänger. Es werden besonders hohe Anforderungen an die Flankensteilheit gestellt. Dies erhöht die Dicke der notwendigen Filterschicht und erschwert somit die Realisierbarkeit der Filter in hoher Güte.

In den folgenden Bildern sind die hergestellten CWDM TFF-Elemente und die dazugehörigen Messkurven dargestellt. Die Filterkurven wurden zwischen zwei Glasfasern gemessen, die senkrecht auf die TFFs ausgerichtet waren. Die Qualität der Filterelemente ist nur mittelmäßig, was sich teilweise auf die nicht optimalen Laserschnittparameter zurückführen lässt und somit die TFF Elemente nicht vollständig getrennt wurden. Dies resultiert sowohl in einer hohen Kantenrauhigkeit, als auch in einer höheren Einfügedämpfung durch nicht optimale Ablösebedingungen.

Bild 34 und 35 zeigt ein 2-Kanal CWDM Filter, welches die beiden Wellenängen 1531nm und 1551nm durchlässt. Die TFF Größe liegt bei 0,2mm x 0,5mm. Bild 36 und 37 zeigt einen 1-Kanal Filter für die Wellenlänge 1571nm. Dieser Filter ist in Einzelteile von 1mm x 0,5mm zerteilt worden. Bild 38 und 39 zeigt einen 1-Kanal Filter für die Wellenlänge 1531nm, Bild 40 und 41 zeigen einen 1-Kanal Filter für die Wellenlänge 1591nm. Beide Filter haben eine Chipgröße von 0,2mm x 0,5 mm. Der 1-Kanal Filter für die Wellenlänge 1551nm ist in den Bildern 42 und 43 dargestellt. In diesem Fall konnte der Filter nicht in einzelne TFF-Elemente zerteilt werden, da sich die TFF-Schicht bereits vor dem Laserschneiden vom Silizium Opfersubstrat getrennt hatte. Ein Einsatz in einem Multiplexer schied daher für dieses TFF-Element aus.



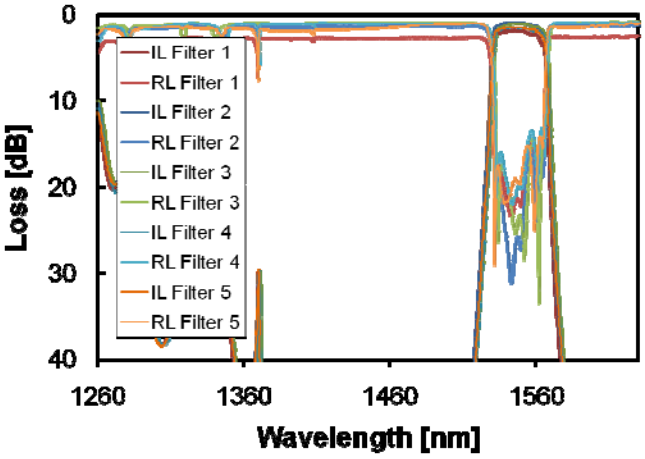
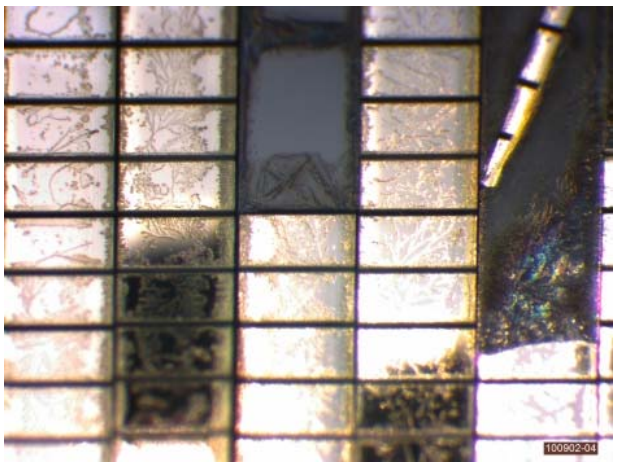


Bild 34: 2-Kanal CWDM 1531-1551, Filterchips (0,2mm x 0,5mm) *Bild 35: 2-Kanal CWDM 1531-1551, Filterkurve*



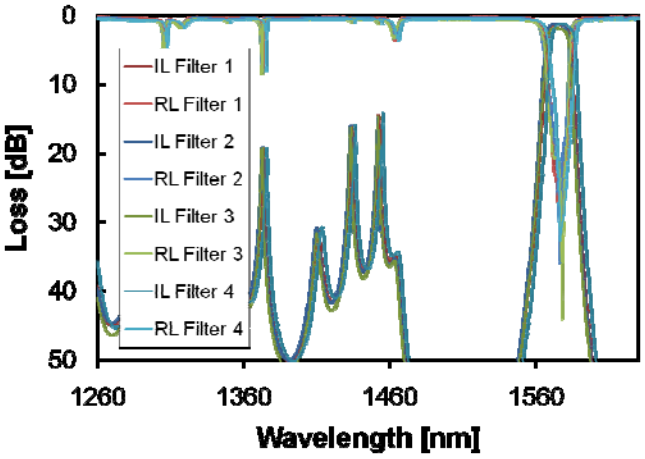
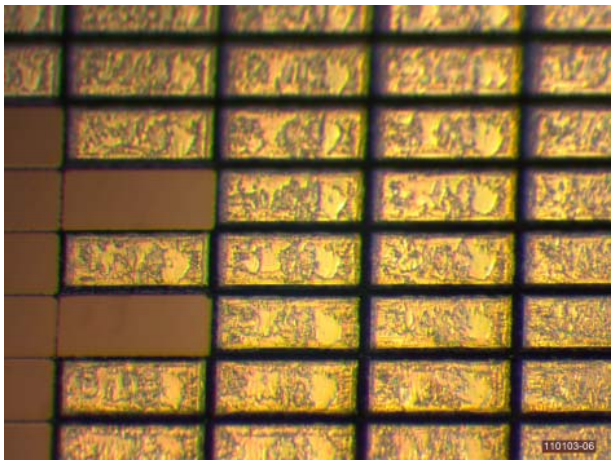


Bild 36: 1-Kanal CWDM 1571, Filterchips (0,5mm x 1mm) Bild 37: 1-Kanal CWDM 1571, Filterkurve



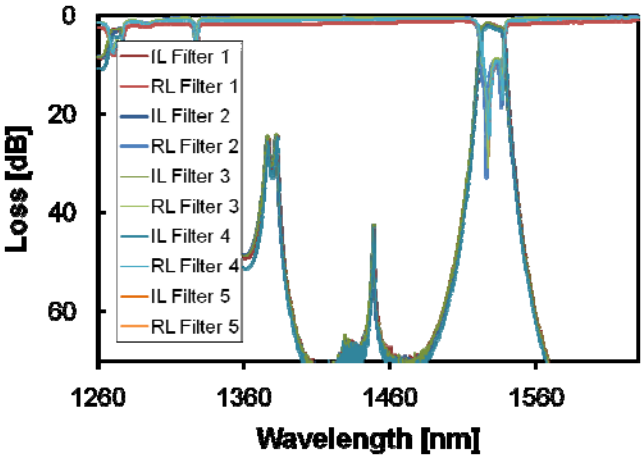


Bild 38: 1-Kanal CWDM 1531, Filterchips (0,2mm x 0,5mm) Bild 39: 1-Kanal CWDM 1531, Filterkurve

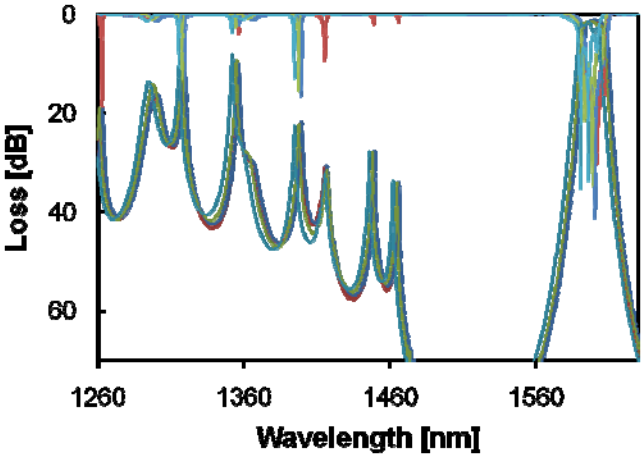


Bild 40: 1-Kanal CWDM 1591, Filterchips (0,2mm x 0,5mm) Bild 41: 1-Kanal CWDM 1591, Filterkurve

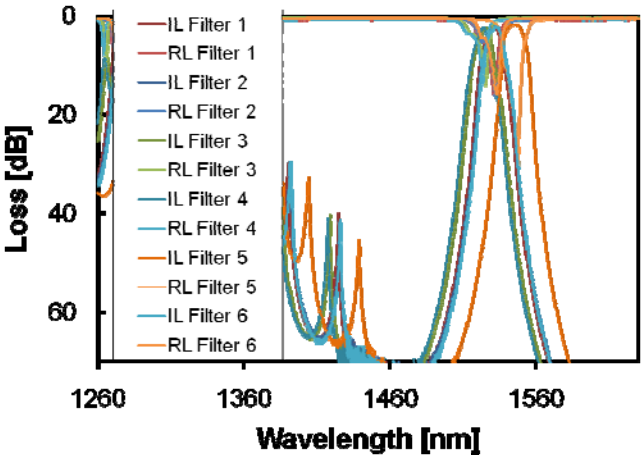


Bild 42: 1-Kanal CWDM 1551, Filterchips nicht zerteilt *Bild 43: 1-Kanal CWDM 1551, Filterkurve*

Bild 44 zeigt eine Zusammenstellung der hergestellten CWDM Filterelemente. Mit diesen wurden anschließend die CWDM Bauelemente bestückt und charakterisiert.

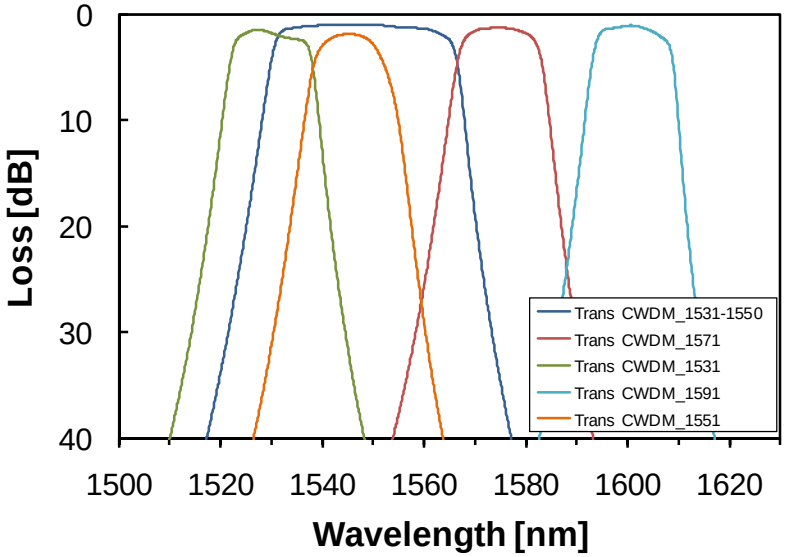
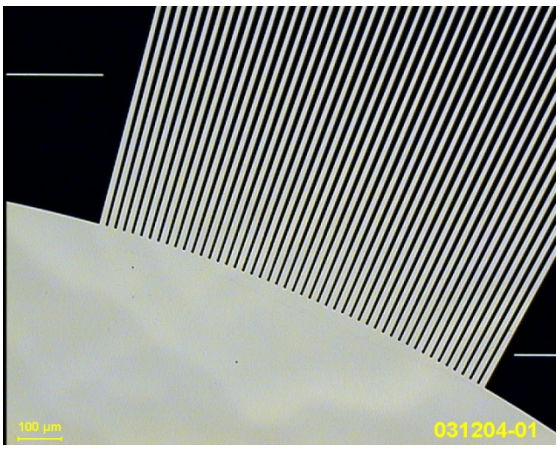


Bild 44: Zusammenstellung CWDM Filter (Messung zwischen zwei Glasfasern bei 90° Einstrahlwinkel)

3.4 WP3: Erprobung neuer Polymermaterialien

Als alternatives Materialsystem wurde CYTOP der Firma ASAHI-Glass (Japan) getestet. Es wurden Schichten hergestellt und charakterisiert, sowie ein AWG hergestellt. Bild 45 zeigt einen Ausschnitt des hergestellten CYTOP AWGs. Das Spektrum ist in Bild 46 dargestellt.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass CYTOP eine sehr niedrige Materialdämpfung über einen weiten Wellenlängenbereich hat. Der Brechungsindexkontrast ist allerdings sehr niedrig. Daher ist dieses Materialsystem für Komponenten mit vielen gekrümmten Wellenleitern nicht geeignet. Wegen des hohen Fluorgehaltes ist die Prozessierung äußerst schwierig und nur schlecht reproduzierbar, wie aus der AWG-Messung ersichtlich ist. Da das Material außerdem nicht kommerziell erhältlich und nicht qualifiziert ist, hat das Konsortium einstimmig beschlossen, weiter mit dem vorhandenen kommerziellen Materialsystem zu arbeiten.



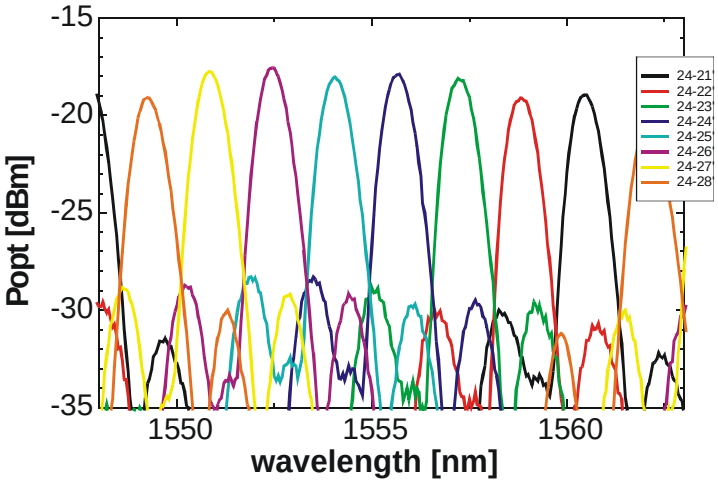


Bild 45: Ausschnitt CYTOP-AWG *Bild 46: Messung CYTOP-AWG*

3.5 WP4.1: Passive CWDM-Bauelemente

Bild 47 zeigt einen Filterplan, mit dem verschiedenartige CWDM-Bauelemente hergestellt werden können. Ein Kantenfilter (grün) mit flacher Filterkante trennt den Express-Kanal um 1310nm von den CWDM Kanälen zwischen 1471nm und 1611nm, indem der Express Kanal reflektiert wird und die CWDM Kanäle transmittiert werden. Die CWDM-Kanäle werden von steilkantigen Filtern (blau) getrennt. Auch hier wird die kürzere Wellenlänge reflektiert und die längere Wellenlänge durchgelassen.

Für eine kaskadierte CWDM Struktur muss die Durchlassbreite der CWDM Filter mindestens einen Kanal (oder breiter) betragen. Hierbei wird immer die längste vorhandene Wellenlänge von den restlichen Kanälen durch Transmission abgetrennt, während die anderen Kanäle reflektiert werden.

Bei einer Baumstruktur wird ein Filter für ein Kanalbündel benötigt, welches die vorhandenen Kanäle zunächst in zwei Gruppen aufteilt. Für ein 4-Kanal CWDM Bauelement wir mindestens eine Durchlassbreite von zwei Kanälen gefordert. Bei 8 Kanälen sind Filter von 4 Kanälen notwendig.

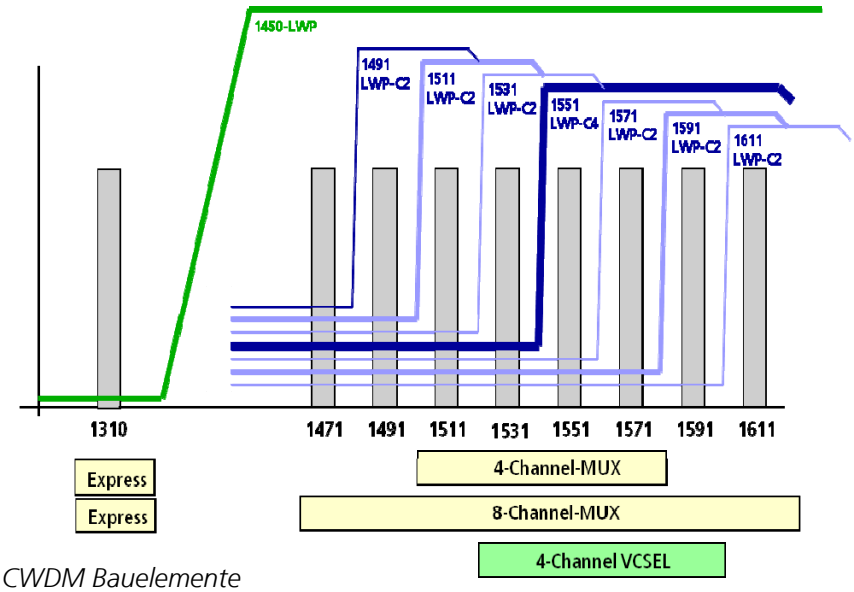
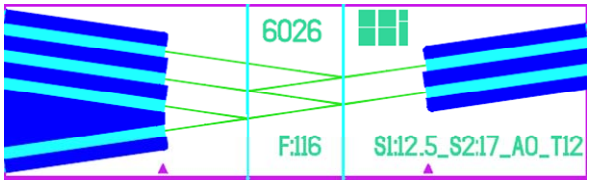


Bild 47: Filterplan für CWDM Bauelemente

Dieser Filterplan bildet die Grundlage für das Design der passiven Mulitplexerstrukturen. Bild 48 zeigt das Layout eines 1+4 Multiplexers in kaskadierter Struktur. Der entsprechende PolyBoard-Chip ist in Bild 49 zu sehen. Die Chipgröße beträgt 5,5mm x 1,6mm.

Zum Vergleich wurde auch das Layout eines 1+4 Multiplexers in Baumstruktur entwickelt und in einen Maskensatz umgesetzt. Die Chipfläche ist zwar mit 6,4mm x 1,6mm etwas größer, als bei der kaskadierten Struktur, jedoch sind die Ausgangspegel wesentlich gleichmäßiger verteilt. Bild 50 zeigt das Layout der Baumstruktur, Bild 51 den entsprechenden Chip.



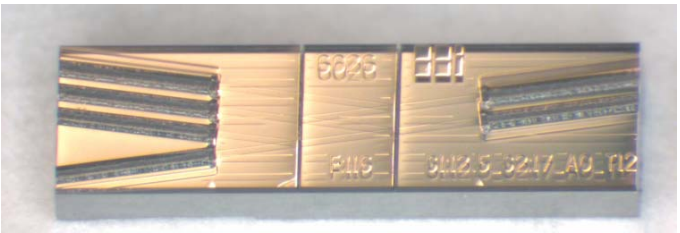


Bild 48: 1+4 MUX; Masken-Layout (kaskadierte Struktur). *Bild 49: 1+4 MUX; PolyBoard (kaskadierte Struktur).*

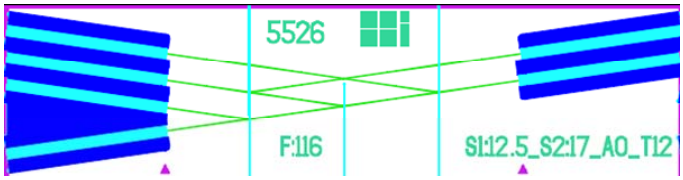


Bild 50: 1+4 MUX; Masken-Layout (Baum-Struktur). *Bild 51: 1+4 MUX; PolyBoard (Baum-Struktur).*

Wie aus der Beschreibung der CWDM-Filter hervorgeht, konnten nicht alle CWDM-Filter in die PolyBoards eingesetzt werden. CWDM-Filter 1551 liegt nur bruchstückhaft vor und CWDM-Filter 1571 nur als 0,5 mm x 1mm große Chips. Daher konnten nur Multiplexer in Baumstruktur bestückt und vermessen werden.

Bild 52 zeigt das Layout mit den Bestückten Filterelementen. Bild *53* ein Foto des CWDM Multiplexers mit bestückten Filterelementen, sowie bestückten Fasern.

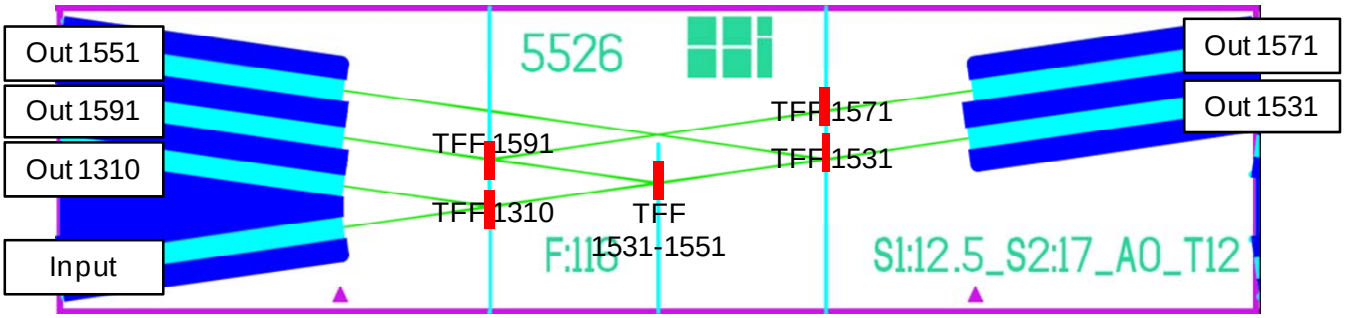


Bild 52: 1+4 MUX; Layout (Baum-Struktur) mit bestückten CWDM Filtern.

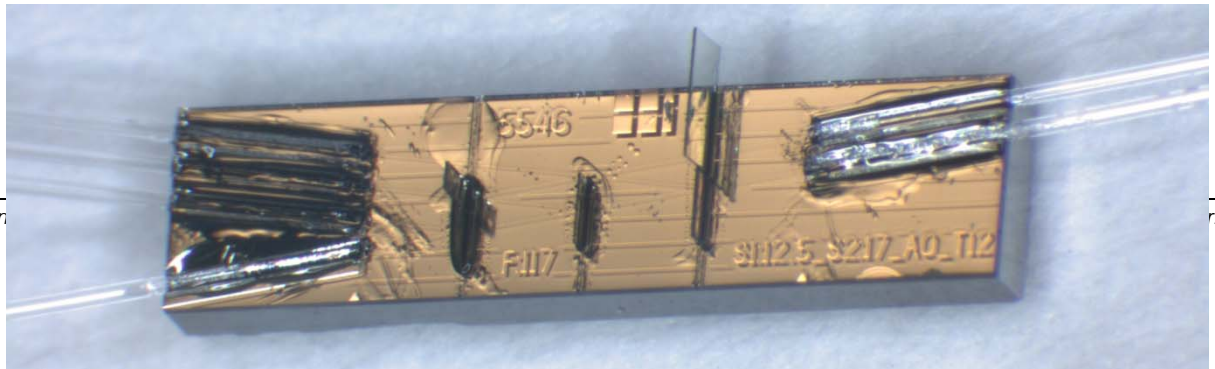


Bild 53: 1+4 MUX; PolyBoard (Baum-Struktur) mit bestückten CWDM Filtern und Faseranschlüssen.

Das gemessene Spektrum an den fünf Ausgängen des CWDM Multiplexers ist in Bild 54 zu sehen. Der Express Kanal (1310nm) hat eine Einfügedämpfung von 2,5 dB. Hier wird das Licht direkt am ersten Filter reflektiert. Die anderen vier CWDM-Ausgänge zeigen Dämpfungswerte zwischen 8 und 11 dB. Hier werden drei bis vier Filter entweder in Transmission bzw. in Reflektion passiert. Die Abweichung der gemessenen Wellenlänge zu der Zielwellenlänge liegt zwischen 0nm und 8nm und ist abhängig von der Position auf dem TFF-Wafer.

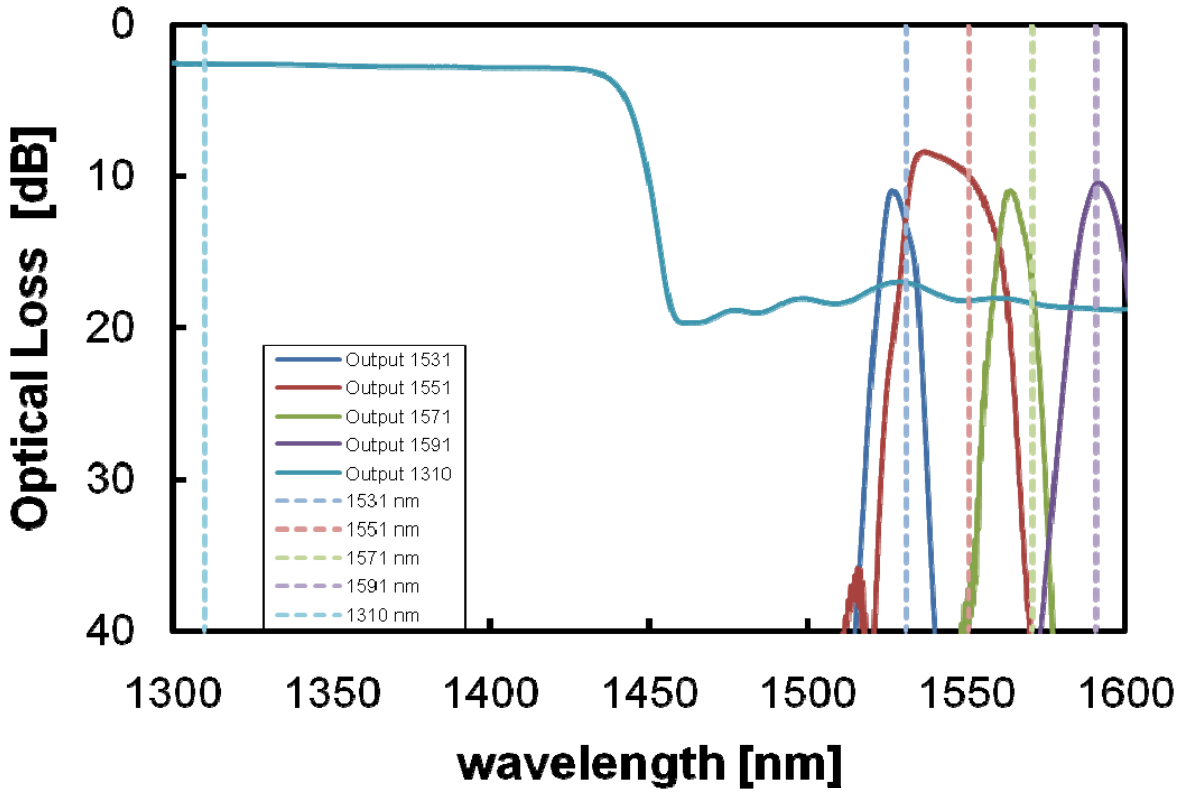


Bild 54: 1+4 MUX (Baumstruktur), Charakterisierung.

3.6 WP4.2: Hybride CWDM-Empfänger

Bild 55 zeigt das schematische Aufbaukonzept eines hybriden Empfängers. Es besteht aus einem PolyBoard mit Wellenleiterstruktur und integriertem 45°-Spiegel, sowie oberflächenbeleuchteten Photodioden. Das ankommende Lichtsignal wird über den metallisierten 45°-Spiegel durch die Rückseite der oben aufliegenden Photodiode eingekoppelt.

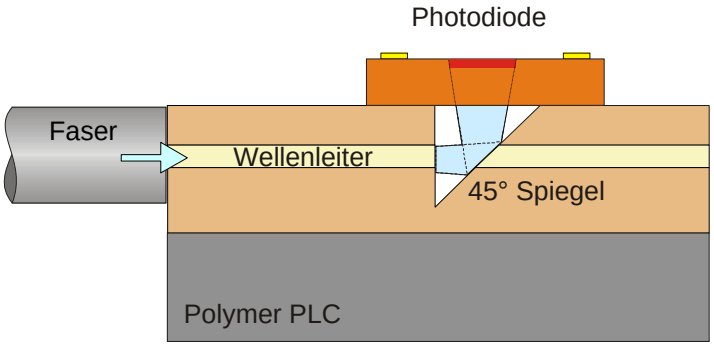


Bild 55: Hybrider Empfängerchip (Schema)

Zur Bestimmung der Koppeleffizienz wurde ein Test-Chip mit 4 Wellenleitern und U-Nuten entworfen (Bild 56) und entsprechende PolyBoards aufgebaut (Bild 57). Der 45°-Spiegel (Bild 58) wurde mittels Chipsäge und anschließender Metallisierung hergestellt.

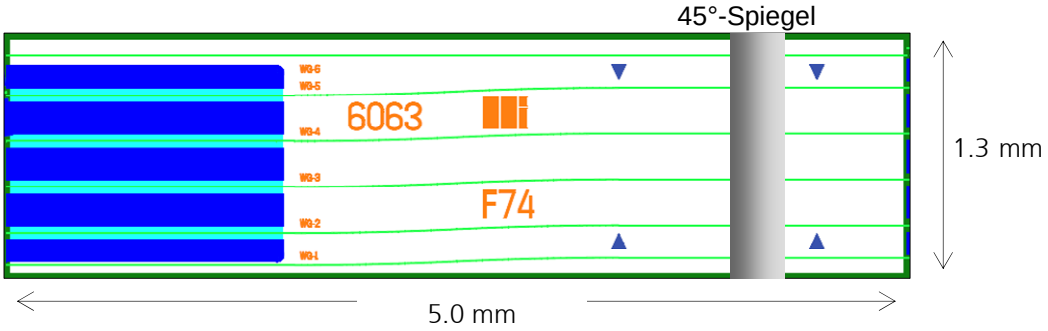
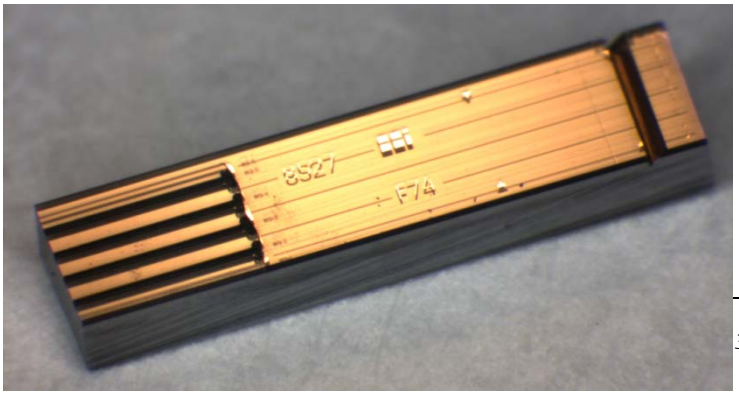


Bild 56: 4-Kanal PolyBoard mit 45 Spiegel (Layout).



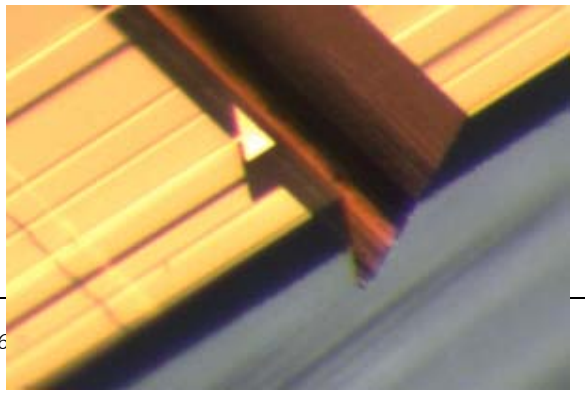
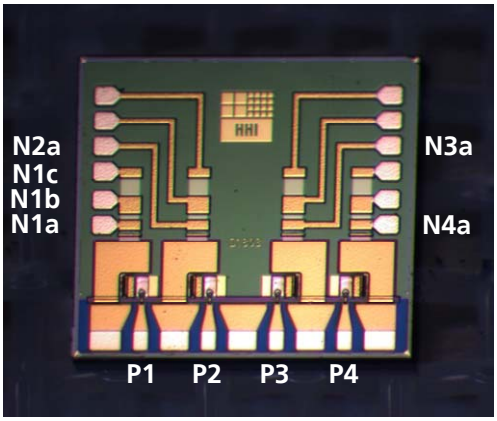


Bild 57: 4-Kanal PolyBoard mit 45°-Spiegel (Chip).

Bild 58: 45°-Spiegel im PolyBoard.

Es wurden 4-fach Photodioden-Arrays, geignet für 25 Gb/s-Detektion pro Kanal, mit BiasT (Bild 59) und ohne BiasT (Bild 60) entwickelt und hergestellt.



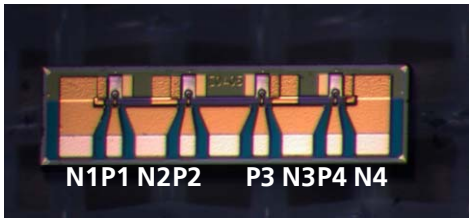


Bild 59: 4-fach Photodiodenarray mit BiasT.

Bild 60: 4-fach Photodiodenarray ohne BiasT.

Die Photodiodenarrays wurden mit einem Pick&Placer passiv zum PolyBoard justiert und mittels UV-Kleber fixiert. Anschließend wurden die Photodiodenströme gemessen, um Einfügedämpfung und Nebensprechen zu bestimmen. Die Empfindlichkeit der Photodioden selbst beträgt ca. 0,65 A/W. Bild 61 zeigt den schematischen Aufbau, Bild 62 ein Foto des 4-Kanal-Empfängers.

Die Einfügedämpfung (Faser → Photodiode) liegt zwischen 1,8 und 2,8 dB (s. Messtabelle, Bild 63). Die Vergrößerung der Einfügedämpfung von Kanal 1 zu Kanal 4 hin, lässt auf einen kleinen Fehlwinkel bei der Ausrichtung des PD-Arrays zum PolyBoard schließen. Dies ist durch die passive Justage und die sehr kleinen Durchmesser (22µm) der aktiven Bereiche der PD-Arrays begründet. Die optischen Nebensprechwerte lagen unter -28 dB.

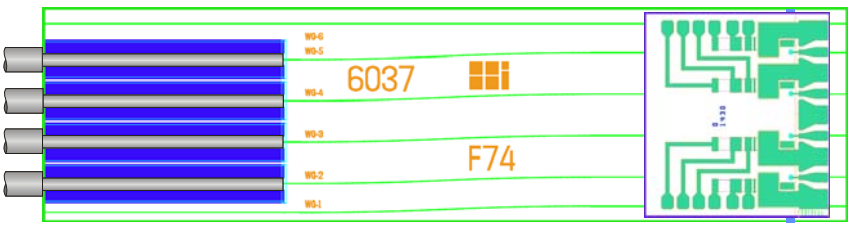


Bild 61: 4-Kanal-Empfänger (PolyBoard + 4-fach PD-Array, Schema).

Chip: 7035		PD: 1911	
	IPhoto [mA]	IL [dB]	Xtalk [dB]
WG2->PD1	0,43	-1,8	0,0
WG2->PD2	0,00	-30,3	-28,6
WG2->PD3	0,00	-31,1	-29,4
WG2->PD4	0,00	-31,1	-29,4
WG3->PD1	0,00	-30,3	-28,4
WG3->PD2	0,42	-1,9	0,0
WG3->PD3	0,00	-31,1	-29,2
WG3->PD4	0,00	-32,1	-30,2
WG4->PD1	0,00	-30,3	-28,2
WG4->PD2	0,00	-29,7	-27,5
WG4->PD3	0,40	-2,2	0,0
WG4->PD4	0,00	-31,1	-29,0
WG5->PD1	0,00	-32,1	-29,3
WG5->PD2	0,00	-31,1	-28,3
WG5->PD3	0,00	-31,1	-28,3
WG5->PD4	0,34	-2,8	0,0

Bild 62: 4-Kanal-Empfänger (PolyBoard + 4-fach PD-Array, Chip).

Bild 63: Messung 4-Kanal-Empfänger.

Zur Demonstration von CWDM-Empfängern wurde ein Maskenlayout entworfen, welches eine U-Nut für die Einkoppelfaser beinhaltet, sowie Schlitze für die Filterelemente und 45°-Auskoppelspiegel zur Ankopplung von Photodiodenarrays. Mit diesem Layout wurden PolyBoards hergestellt. Bild 64 zeigt das Maskenlayout für einen 4-Kanal CWDM-Empfänger in kaskadierter Struktur. Der entsprechende Chip ist in Bild 65 zu sehen. Das Layout und das PolyBoard in Baumstruktur sind in den Bildern *66* und *67* dargestellt.

Für die Bestückung wurden zwei 2-Kanal Photodiodenarrays mit ca. 60µm Durchmesser und einem Abstand von 250 µm verwendet. Bild 68 zeigt den schematischen Aufbau mit den bestückten CWDM Filtern, sowie den beiden Photodiodenpaaren. Bild 69 zeigt ein Foto des aufgebauten CWDM Empfängers mit Filterelementen, Photodioden und Faseranschluss.

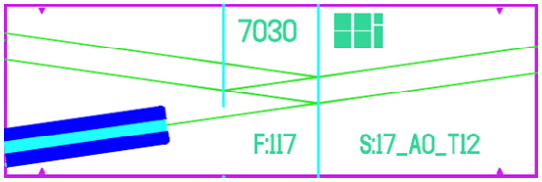


Bild 64: 4-Kanal CWDM Rx (Layout, kask. Struktur)

Bild 65: 4-Kanal CWDM Rx (PolyBoard, kask. Struktur)

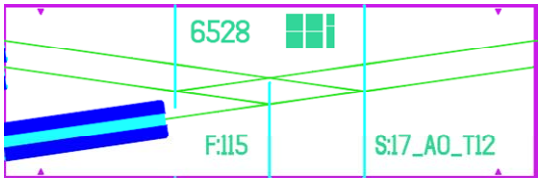


Bild 66: 4-Kanal CWDM Rx (Layout, Baum-Struktur)

Bild 67: 4-Kanal CWDM Rx (PolyBoard, Baum-Struktur)

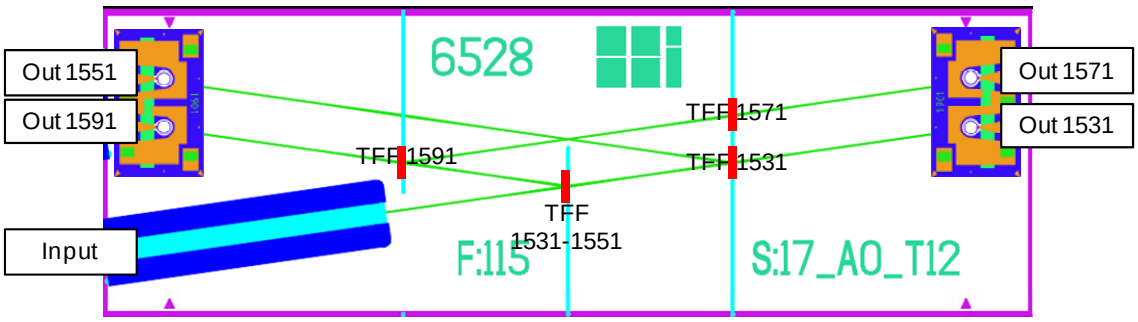
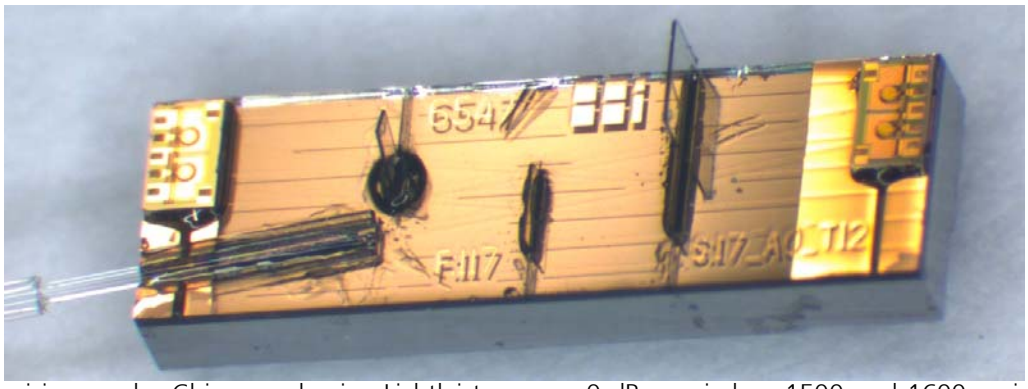


Bild 68: 4-Kanal CWDM Rx (Schema, Baum-Struktur) *Bild 69 (unten): 4-Kanal CWDM Rx (Aufbau, Baum-Struktur)*



Zur Charakterisierung des Chips wurde eine Lichtleistung von 0 dBm zwischen 1500 und 1600nm in die Glasfaser eingestrahlt und die Responsivität an den vier Ausgangsdioden gemessen. In Bild 70 sind die Messwerte dargestellt. An drei Ausgängen wurde eine Responsivität von ca. 0,2 A/W gemessen. Bei einer Responsivität der direkt bestrahlten Diode von 0,9A/W entspricht dies einer Einfügedämpfung von 7dB. Der 1531nm-Kanal erreichte eine Responsivität von 0.08 A/W was einer Dämpfung von 11 dB entspricht. Eine leichte Verschiebung der gemessenen Wellenlängen zu den Zielwellenlängen zwischen 0 und 7nm wurde, ähnlich wie bei den Multiplexern beobachtet.

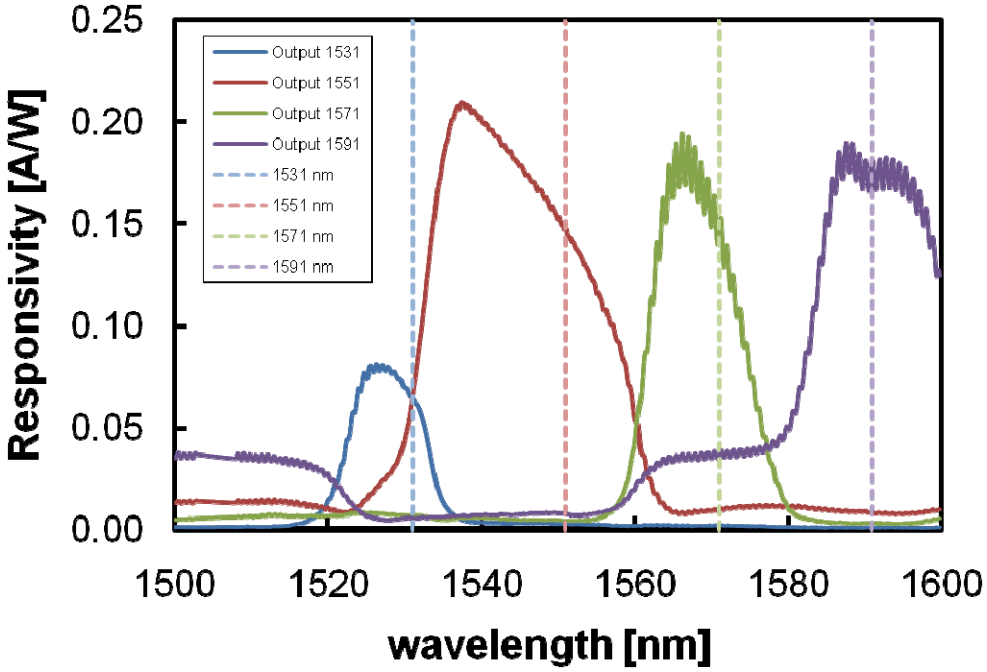


Bild 70: 4-Kanal CWDM Rx (Baum-Struktur), Charakterisierung

3.7 WP4.3: Hybride CWDM Sender

Das Aufbaukonzept für die hybriden CWDM-Sender ist in Bild 71 dargestellt. Ein VCSEL wird zunächst auf ein Linsen-Submout montiert und dann über einem 45°-Spiegel des PolyBoards optimal platziert. Durch die Linse wird der Laserstrahl optimal fokussiert und über den 45°-Spiegel in das PolyBoard eingekoppelt.

Die VCSEL, sowie die Linsensubmounts werden von dem Projektpartner Vertilas entwickelt und hergestellt. Bild 72 zeigt eine typische PI-Kennlinie eines VCSELs (~1330nm) bei unterschiedlichen Temperaturen. In Bild 73 wird die Wellenlängenverschiebung in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

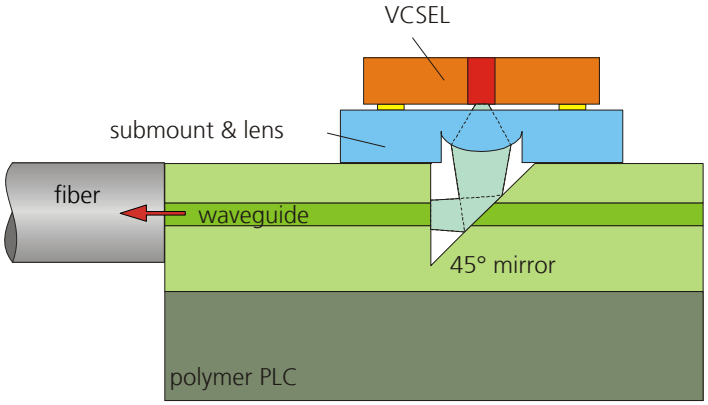


Bild 71: Vertikales Konzept, Schema (PolyBoard + VCSEL mit Linsen-Submount).

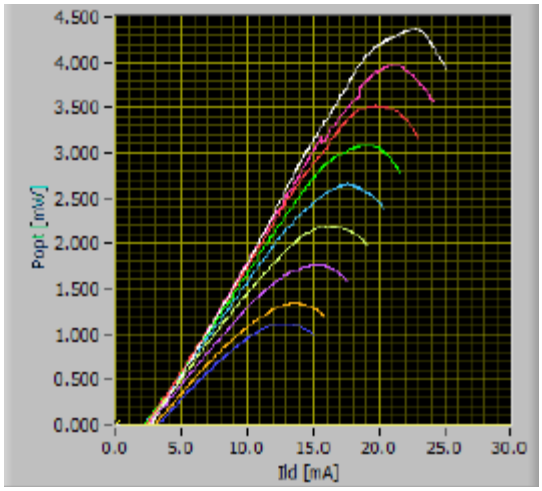


Bild 72: VCSEL 1330nm, PI-Kennlinie (Vertilas)

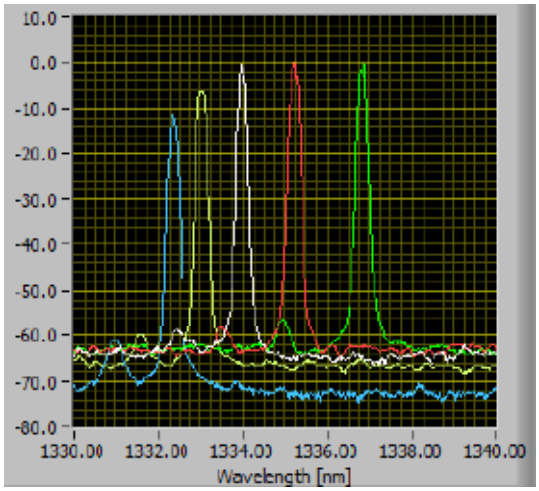


Bild 73: VCSEL 1330nm, Tempertur-Shift (Vertilas)

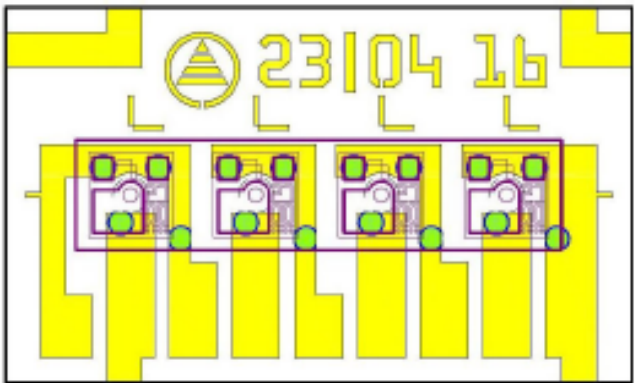


Bild 74: Schema: VCSEL-Array auf Linsensubmount

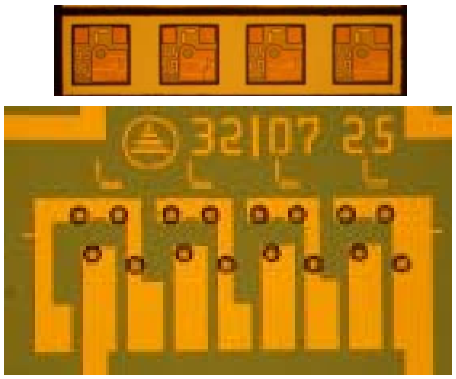


Bild 75: a) VCSEL-Array, b) Linsensubmount (Vertilas)

Bild 74 zeigt das Layout eines 4-Kanal Linsensubmounts mit integrierten Linsen und Ansteuerelektroden, sowie einem darauf platzierten 4-Kanal VCSEL-Arrays mit einem Raster von 250µm. Dieser soll im Flip-Chip Verfahren auf das Linsensubmount montiert werden. In Bild 75 sind entsprechende Fotos vom VCSEL-Array und vom Linsensubmount zu sehen.

Für erste Testaufbauten wurden 4-Kanal PolyBoards mit 45°-Spiegel hergestellt, auf die dann die VCSEL montiert wurden. Bild 76 zeigt das Layout, Bild 77 zeigt einen Aufbau eines einzelnen VCSELs, der beim Projektpartner Vertilas entstanden ist. Es wurde im besten Fall eine Koppeleffizienz VCSEL → PolyBoard von über 50% erreicht. Diese Art der Ankopplung von Laserdioden an einen Polymerwellenleiter verlangt aber eine - da es sich um eine Monomodekopplung handelt - eine äußerst diffizile Zweifachjustage (Laser/Linse; Linse/Wellenleiter), und es ist noch nicht abzusehen, ob und mit welchem Grad an Aufwand und Reproduzierbarkeit diese Lösung umsetzbar ist.

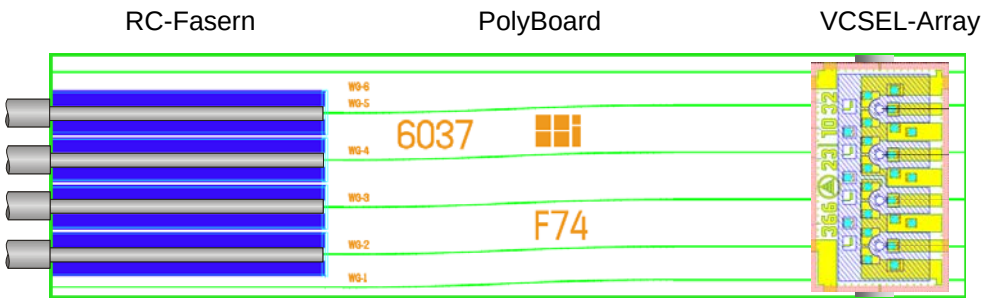


Bild 76: Vertikales Konzept, Layout (PolyBoard + VCSEL mit Linsensubmount).

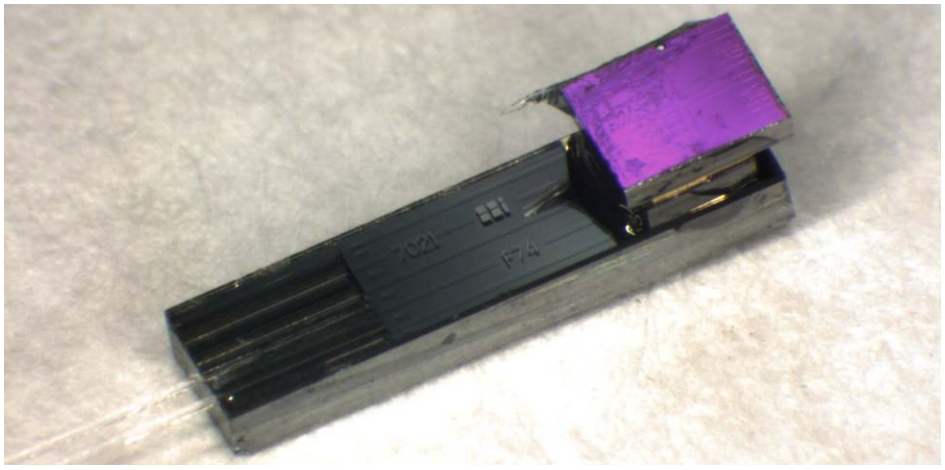


Bild 77: Vertikales Konzept, Aufbau (PolyBoard + VCSEL mit Linsen-Submount).

Zum Aufbau von CWDM Sendern wurden PolyBoards in kaskadierter und Baumstruktur entwickelt und hergestellt. Im Gegensatz zu den Empfängern musste in diesem Fall ein Abstand der VCSEL zueinander von 500µm vorgehalten werden, da die VCSEL mit den unterschiedlichen CWDM-Wellenlängen zunächst als einzelne Chips vorliegen und in einem Raster von 500µm auf das Linsensubmount aufgebracht werden können. Weiterhin sind die Spiegelstrukturen größer und damit an die Fokuslänge von 120µm des Linsensubmounts angepasst. Bild 78 und 79 zeigen die PolyBoards in kaskadierter Struktur. In Bild 80 und 81 sind die entsprechenden Baumstrukturen zu sehen.

Bild 82 und 83 zeigen das schematische Layout mit bestückten Filterelementen, VCSEL und Faseranschluss. Da die Montage von VCSEL auf Linsensubmount sehr viel aufwendiger war als zum Projektbeginn erwartet, konnte ein komplettes CWDM-Sendermodul mit VCSEL-Chips bis zum Projektende nicht fertiggestellt werden.

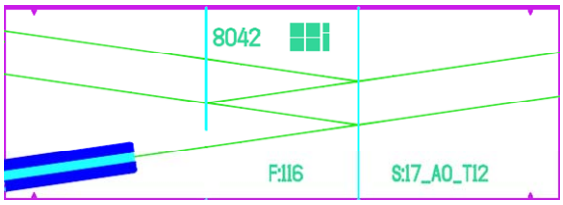


Bild 78: 4-Kanal CWDM Tx (Layout, kask. Struktur)

Bild 79: 4-Kanal CWDM Tx (PolyBoard, kask. Struktur)

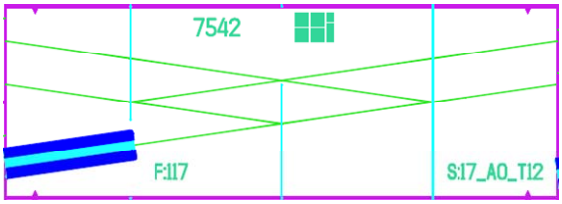
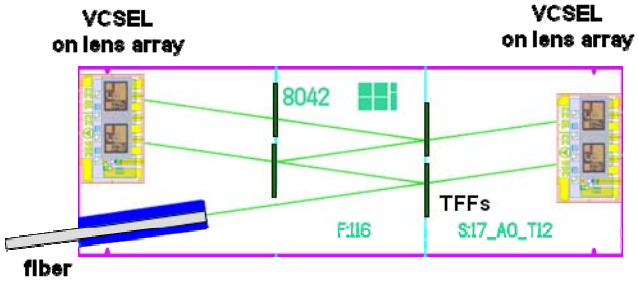


Bild 80: 4-Kanal CWDM Tx (Layout, Baum-Struktur)

Bild 81: 4-Kanal CWDM Tx (PolyBoard, Baum-Struktur)



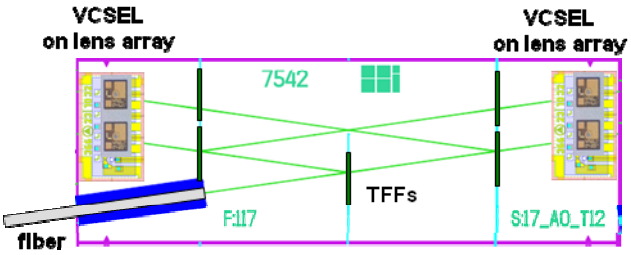


Bild 82: 4-Kanal CWDM Tx (Schema, kask. Struktur) *Bild 83: 4-Kanal CWDM Tx (Schema, Baum-Struktur)*

3.8 WP5.1: Herstellung DWDM-Multiplexer

Bild 84 zeigt das Aufbaukonzept eines DWDM Multiplexer Senders. Dieser besteht aus einem AWG und mehreren Lasern verschiedener Wellenlängen, die durch das AWG auf eine Glasfaser vereinigt werden. Die Ankopplung der Laser erfolgt über die Stirnfläche, die miteinander verklebt werden.

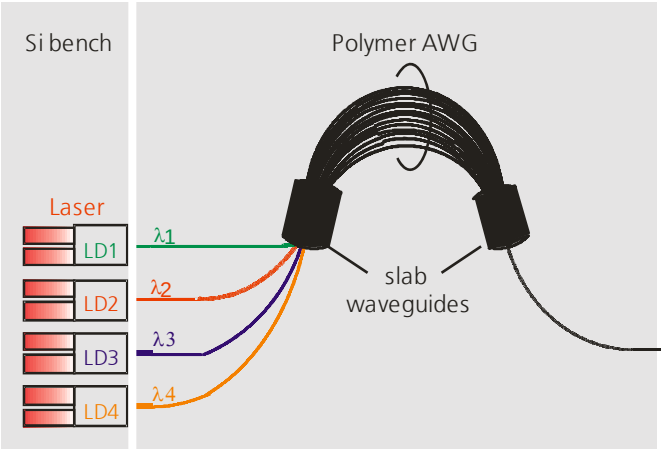


Bild 84: Schematischer Aufbau: DWDM Multiplexer Sender

Zur Herstellung einen DWDM MUX-Senders wurde zunächst die Einkopplung eines endflächenstrahlenden Lasers untersucht. Bild 85 zeigt das horizontale Koppelkonzept mit einem Stirnflächenstrahler als Lichtquelle. Zunächst wurde die Ankopplung eine gekrümmten Lasers (CSDFB) untersucht, der spezielle Vorteile bei der Ausbeute sowie bei der Rückreflektion hat. Zur Ankopplung eines CSDFB-Lasers wurde ein angepasstes PolyBoard-Design entworfen, welches den schrägen Abstrahlwinkel des CSDFB-Lasers aufnimmt (Bild 86), inkl. U-Nut zur passiven Faserankopplung. Bild 87 zeigt den Aufbau, an dem verschiedene Messungen durchgeführt wurden. Die PI-Kennlinie (Bild 88) zeigt eine optische Ausgangsleistung von 16mW bei 100mA Laserstrom (ex fibre). Die Wellenlänge liegt bei 1492nm mit einer Seitenmodenunterdrückung von >40 dB (Bild 89). Die Abhängigkeit der Wellenlänge und des SMSR von Temperatur und Laserstrom zeigen die Bilder 90 und 91.

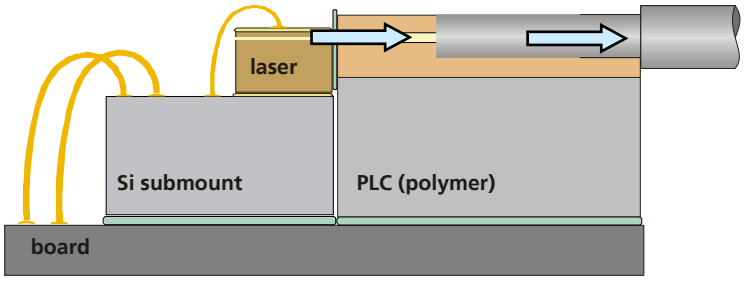


Bild 85: Horizontale Konzept, Schema (PolyBoard + CSDFB auf Silizium-Submount).

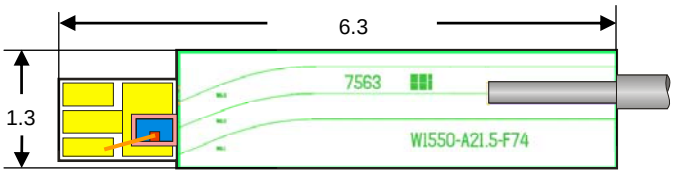


Bild 86: Stirnflächenkopplung (Layout: LD+PolyBoard). *Bild 87: Stirnflächenkopplung (Aufbau: LD+PolyBoard).*

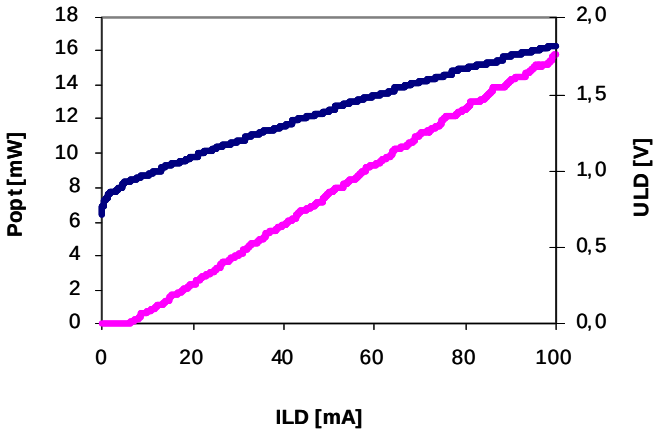


Bild 88: Sendemodul: PUI-Kennlinie.

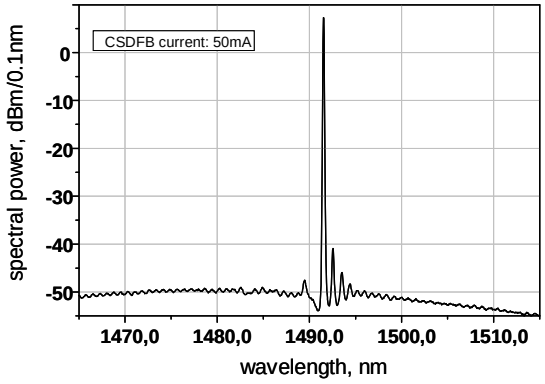


Bild 89: Sendemodul: Spektrum

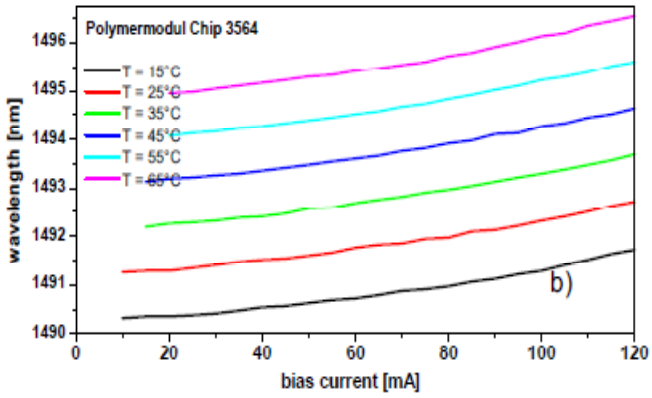


Bild 90: Sendemodul: Temp.-Abhängigkeit Wellenlänge.

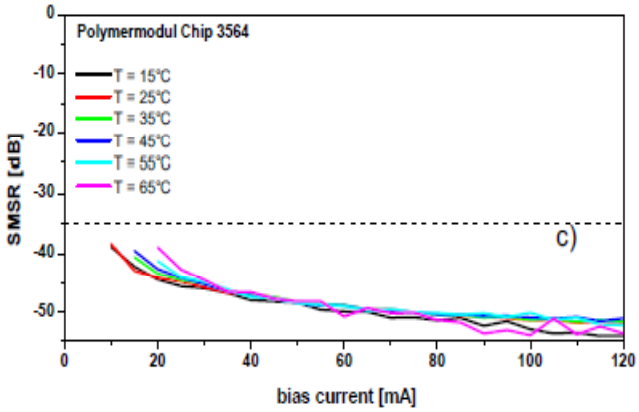


Bild 91: Sendemodul: Temp.-Abhängigkeit SMSR.

Es wurden verschiedene AWGs untersucht, um die Funktion des DWDM-Multiplexers zu realisieren. Auf Anregung des Projektpartners ADVA wurde zunächst ein DWDM-Multiplexer in Form eines AWGs mit einem Kanalabstand von 25 GHz und 50 GHz simuliert und hergestellt. Das Masken-Layout für einen 4-Zoll Wafer zeigt Bild 92. Es haben drei AWGs mit 25 GHz Kanalabstand und zwei AWGs mit 50 GHz Kanalabstand Platz. Bild 93 zeigt den fertig gestellten und bereits zerteilten 4-Zoll Wafer.

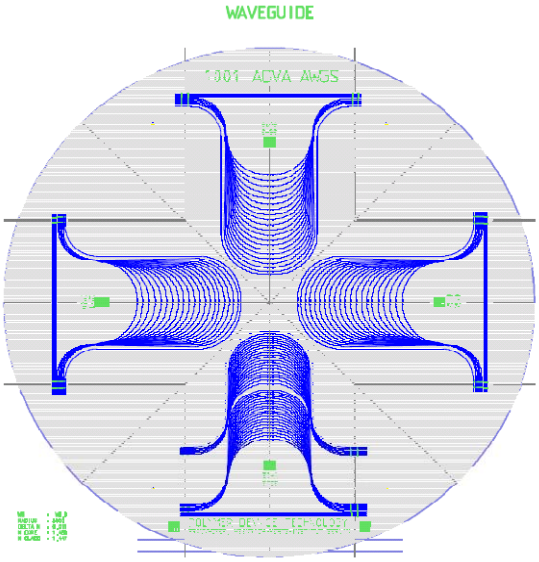


Bild 92: 4"-Layout: 3 x 25 GHz AWG, 2 x 50 GHz AWG. *Bild 93: 4"-Wafer zerteilt (3 x 25 GHz, 2 x 50 GHz AWG).*

Die Bilder 94 und 95 zeigen die gemessenen Spektren eines 25 GHz und eines 50 GHz AWGs. Das 25 GHz AWG hat eine Einfügedämpfung von 8,7 dB und eine Nebensprechunterdrückung von 15 dB. Das 50 GHz AWG hat eine Einfügedämpfung von 7,3 dB und eine Nebensprechunterdrückung von 10 dB. Im Ergebnis lässt sich sagen, dass dieses Layout bereits sehr empfindlich auf sehr geringe technologische Inhomogenitäten (Brechzahlschwankung) reagiert, die bei einem Chip in dieser Größenordnung kaum vermeidbar sind.

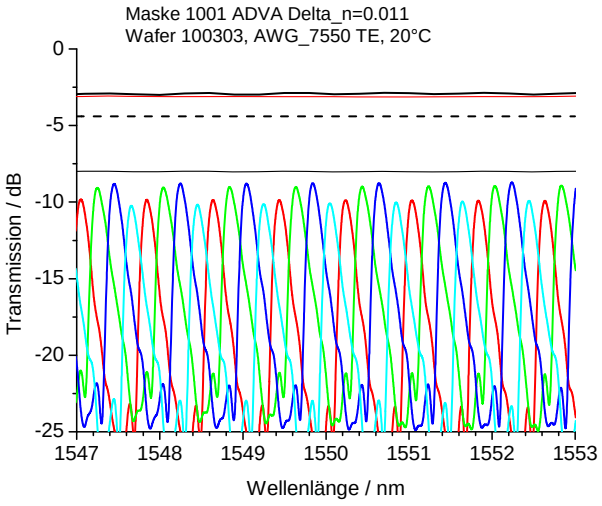


Bild 94: 25 GHz AWG – gemessenes Spektrum.

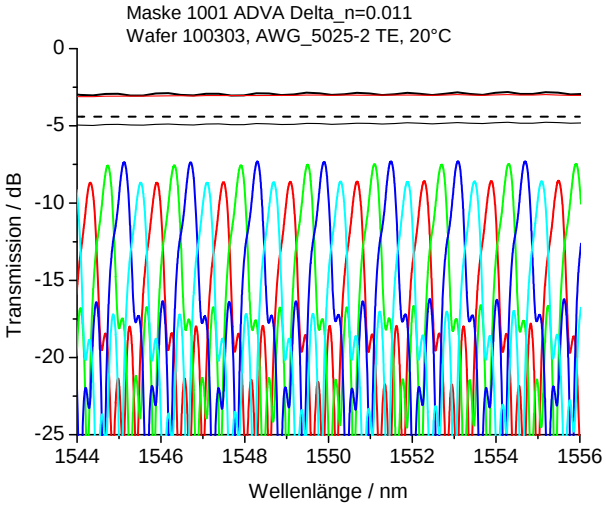


Bild 95: 50 GHz AWG – gemessenes Spektrum.

Daraufhin wurden weitere AWG Strukturen mit einem Kanalabstand von 100 GHz entwickelt und hergestellt. Bild 96 zeigt das Layout eines AWGs mit 12 Eingangswellenleitern und 5 Ausgangswellenleitern. Die Eingangswellenleiter sind für die Ankopplung mit einem Laserchip optimiert. Die Ausgangswellenleiter hingegen weisen einen Taper für eine optimale Faserankopplung auf. Bild 97 zeigt das AWG-Spektrum gemessen zwischen zwei Standard Single-Mode Fasern. Es wurde eine Einfügedämpfung von 7,2dB und eine Nebensprechunterdrückung von besser als 25dB gemessen. Es ist hierbei zu berücksichtigen, dass die Einfügedämpfung bei dieser Messung erhöht ist, da der Eingangswellenleiter nicht für eine Faserankopplung optimiert ist.

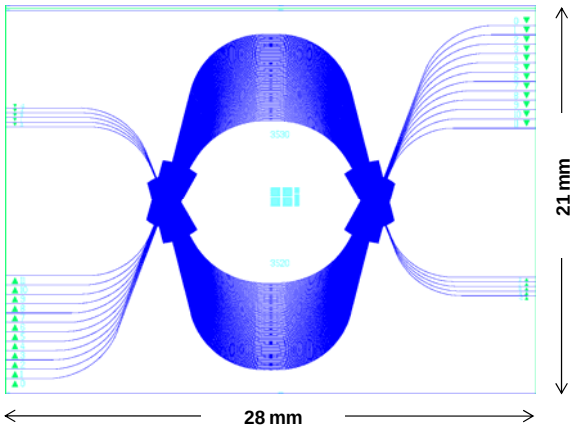


Bild 96: 100 GHz AWG – Maskenlayout.

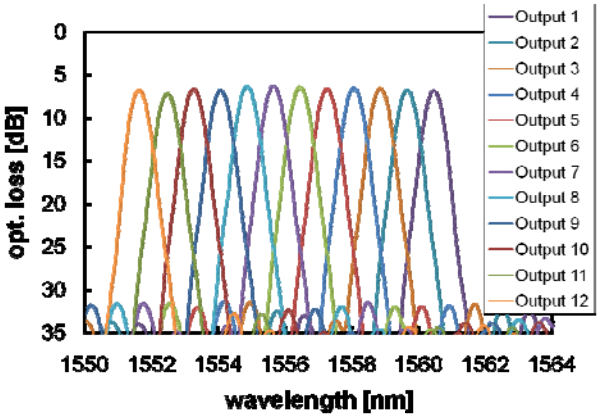


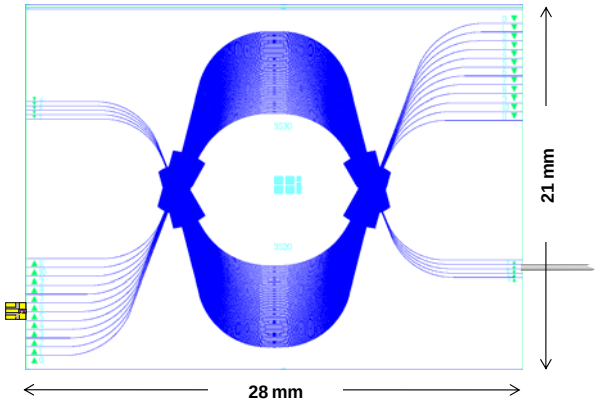
Bild 97: 100 GHz AWG – gemessenes Spektrum.

Das AWG wurde anschließend mit einer Laserdiode stirnflächig verkoppelt. Bild 98 und 99 zeigt die Laserdiode auf einem Siliziumträger und die Ankopplung an das AWG. Bild 100 verdeutlicht den Aufbau anhand des Layouts.

Messungen der optischen Leistung wurden mittels einer Standard Single-Mode Faser sowohl direkt an der Endfläche des Lasers vorgenommen sowie nach Laserankopplung am Ausgang des AWGs. Die PI-Kennlinie ist für beide Fälle in Bild 101 dargestellt. Die direkte Messung (schwarze Kurve) zeigt eine typische PI-Kennlinie, die bei 50mA Laserstrom eine optische Leistung von 4,5 mW an der Faser ergibt. Die Messung hinter dem AWG (rote Kurve) zeigt die Durchlasscharakteristik des AWG Kanals, da sich die Wellenlänge entsprechend dem Laserstrom ebenfalls verschiebt. Bei 50mA Laserstrom werden 2mW optische Leistung in der Faser gemessen. Dies ergibt eine Zusatzdämpfung von ca. 4 dB. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Feldanpassung zwischen Laser und Faser nicht optimal ist, d.h. das AWG passt durch unterschiedliche Taperung auf der Eingangs- und Ausgangsseite auch die Felder an und reduziert so die Koppelverluste.

Bild 98: Stirnflächenkopplung Laserdiode - AWG.

Bild 99: AWG mit Laserdiode.



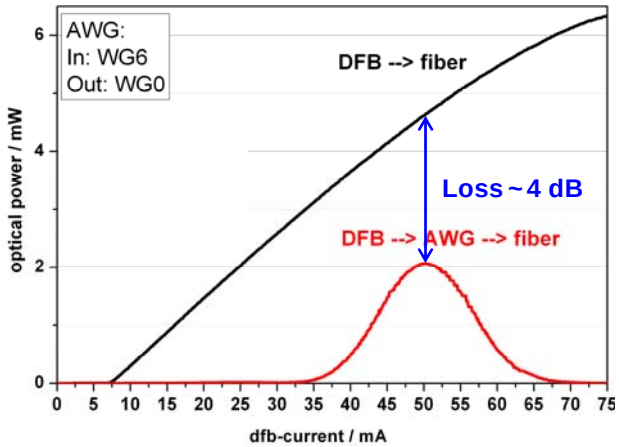


Bild 100: Layout: Laserdiode - AWG.

Bild 101: Laserkennlinie mit (rot) und ohne (schwarz) AWG.

3.9 WP5.2: Alternatives Konzept DWDM-Multiplexer

Es wurden theoretische Untersuchungen am LZH durchgeführt, DWDM-Multiplexer auf Basis von Dünnschichtfilterelementen herzustellen. Als grundlegende Aussage gilt, dass die Filterkurven mit zunehmender Anzahl von Filterschichten an Steilheit gewinnen und dadurch prinzipiell auch schmalbandiger werden können.

Ein 5nm breiter Bandpass ist theoretisch noch mit 20µm Gesamtdicke der Filterschichten machbar. Es können auch einige TFF-Filter wie oben gezeigt kaskadiert werden, was bei geringer Kanalzahl und genügend breiten Filterkurven Sinn macht. Bei schmaleren Filterkurven (1,6nm / 0,8nm / 0,4nm), wie sie in DWDM-Komponenten üblich sind, nimmt die Gesamtschichtdicke der TFFs schnell zu. Durch die breiteren Schlitze erhöht sich die Einfügedämpfung pro Filterelement. Insbesondere bei vielen äquidistanten Filterkurven zeigt hier das AWG deutliche Vorteile gegenüber einer TFF-Lösung. Eine Dünnschichtfilter-Lösung wird daher in diesem schmalbandigen Bereich nicht weiter verfolgt.

3.10 WP6: Projekt begleitende Maßnahmen

In regelmäßigen Arbeitstreffen aller beteilgten Projektpartner wurden die technische Entwicklung, die Patentsituation sowie insbesondere Standardisierungsaktivitäten und Marktentwicklungen diskutiert und bewertet. Einige Firmenpartner sind Mitglieder internationaler Standardisierungsgremien (z.B. IEEE 802.3; Higher Speed Study Group: 4x25 Gbit/s, LAN-WDM mit 5 nm Kanalabstand um 1300 nm; IEC 61753-085-ff / IEC 62074-ff / IEC 61300-ff: Passive High-Pass, Low-Pass-, CWDM-Multiplexer). So wurde ein kontinuierliches Benchmarking bzgl. Zeit- und Meilensteinplanung durchgeführt und die Folgerungen für das MiniWDM-Projekt abgeleitet. Die Ergebnisse sind beispielsweise in die Spezifikationen für die 1x2 und 1x5 TFF Multiplexer mit eingeflossen. Darüber hinaus wurde der Entwicklungsstand im Vorhaben regelmäßig an den technischen Anforderungen marktfähiger Komponenten und unter dem Gesichtspunkt der wirtschaftlichen Herstellbarkeit gemessen und eine Analyse für weiteren FuE-Bedarf erstellt, die als Grundlage für die Definition von Nachfolgeprojekten diente.

4. Ausblick

Das Vorhaben MiniWDM diente dazu, das Potential einer photonischen Hybridintegration auf der Basis einer Polymerwellenleiter-Plattform zu untersuchen. Die wesentlichen Bausteine dieser Technologie – Monomode-Wellenleiter in Polymeren, passive Faserankopplung mittels U-Nuten, Dünnschichtfilter, vertikale Kopplung von vertikal beleuchteten Photodioden und vertikal emittierenden Laserdioden mittels Umlenkspiegeln, Stirnflächenkopplung von kantenemittierenden Laserstrukturen – wurden realisiert und untersucht und ihre

Funktionsweise an Hand von anwendungsrelevanten optischen Komponenten demonstriert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Polymer basierte Integrationsplattform ein breites Anwendungspotential aufweist, nicht nur für die Glasfaserkommunikationstechnik. Es hat sich aber auch gezeigt, dass bis zur Umsetzung in marktfähige Produkte mit spezifizierten Performancedaten noch erhebliche FuE-Arbeiten zu leisten sind. Die wesentlichen „Baustellen" wurden identifiziert und zur Grundlage eines Folgeprojektes (PolyBoard") gemacht, in dem die Entwicklungen weiter vorangetrieben werden sollen. An diesem Vorhaben, eingereicht im BMBF-Programm „Innovative regionale Wachstumsprogramme", sind neben dem LZH und FhG-HHI auch drei Partner aus dem Konsortialkreis des MINIWDM-Projekts beteiligt (Beteiligung unterliegt regionalen Beschränkungen). Mit diesem Vorhaben wird eine Basis vorhanden sein, die noch bestehenden Hindernisse für eine wirtschaftliche Umsetzung weiter abzubauen. Das Vorhaben wurde positiv begutachtet und soll gefördert werden, liegt aber wegen kurzfristig entstandener finanzieller Engpässe im Förderprogramm zurzeit noch „auf Eis". Darüber hinaus verwertet das HHI die Ergebnisse in weiteren Projekten, an denen ebenfalls MiniWDM-Partner beteiligt sind.