

Optische Motherboard Technik auf Polymerbasis

Keil, Norbert; Kleinert, Moritz; Zawadzki, Crispin; de Felipe, David und Brinker, Walter

Zusammenfassung — Am Beispiel einer Optical Networking Unit (ONU) für zukünftige passive optische Kommunikationsnetze wird eine optische Motherboard Technik auf Polymerbasis vorgestellt. Es werden U-Nuten zur passiven Glasfaserkopplung, Dünnschichtelemente zur Realisierung von optischen Filterfunktionen, die Ankopplung von Fotodioden über integrierte 45°-Spiegel sowie weit durchstimmbare hybrid-integrierte InP/Polymer Laser beschrieben und es wird auf die besonderen Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik eingegangen. Abschließend werden erste Ergebnisse zu mehrlagigen Wellenleiterstrukturen auf Polymerbasis vorgestellt, die die Ankopplung von Laser- und Fotodioden-Arrays an Multikernfasern (MKF) ermöglichen.

1. EINLEITUNG

Die Datenmengen, welche über die weltweiten Glasfasernetze ausgetauscht werden, verzeichnen aller Voraussicht nach zwischen 2013 und 2018 ein jährliches Wachstum von 21%. Ein Ende dieser Entwicklung ist nicht in Sicht [1]. Haupttreiber dieser Entwicklung sind Dienstleistungen wie Cloud-Computing, Voice-over-IP und insbesondere IPTV. Um diese neuen Dienste effektiver nutzen zu können, fragen insbesondere die Endkunden bei den Netzbetreibern immer höhere Bandbreiten nach. Um dieses enorme Bandbreitenwachstum in den Zugangszugnetzen umsetzen zu können sind, auf Grund ihrer im Vergleich zu kupfer-basierten Netzen deutlich größeren Übertragungskapazität, Fiber-to-the-Home (FTTH) und Fiber-to-the-Building (FTTB) –Netzwerke prädestiniert.

Die opto-elektronischen Bauelemente in derartigen passiven optischen Netzwerken (PON) unterliegen besonderen Anforderungen: Bei einer hohen Leistungsfähigkeit der Komponenten müssen diese gleichzeitig in großer Stückzahl und, auf Grund der Kostensensitivität der Endkunden, besonders preisgünstig hergestellt werden können. Dies gilt insbesondere für die „Optical Networking Unit“ (ONU), welche auf Nutzerseite für den Empfang und den Versand von Daten benötigt wird [2].

Manuskript erhalten am 10. Mai 2015. Diese Arbeit wurde in Teilen gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Projekte POLYBOARD, CELTIC-SASER und ADVANTAGE-PON.

Alle Autoren arbeiten am Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Abteilung Photonische Komponenten, Deutschland (E-Mail: norbert.keil@hhi.fraunhofer.de).

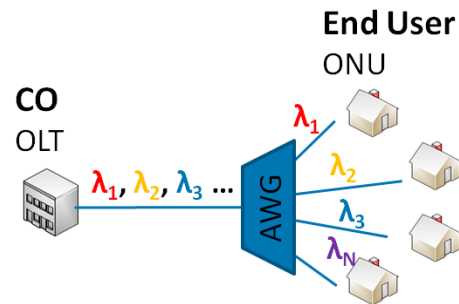


Abb. 1: Konzept eines passiven optischen Netzes (PON) mit Wellenlängenmultiplex (WDM) und Optical Line Terminal (OLT) im Central Office (CO) sowie den Optical Networking Units (ONU) bei den Endkunden.

2. POLYBOARD-PLATTFORM

In den letzten Jahren wurde mit der PolyBoard-Plattform eine optische Motherboard Technik entwickelt, die es ermöglicht, diesen Ansprüchen gerecht zu werden. Die PolyBoard-Plattform beruht auf der hybriden Integration von aktiven optoelektronischen Bauelementen auf InP-Basis, wie Laserdioden, Fotodetektoren und Gain Chips, mit passiven Polymer-basierten Wellenleiternetzwerken, die die optischen Funktionen realisieren [3,4]. Die hybride Integration dieser Bauelemente erlaubt die Auswahl der am besten geeigneten Komponenten für die gegebene Aufgabe. Zudem kann im Gegensatz zur monolithischen Integration der opto-elektronischen Funktionen die benötigte Fläche an vergleichsweise teurem Halbleitermaterial deutlich reduziert werden, was Kostenvorteile mit sich bringt. Allerdings stellt eine hybride Integration auch besondere Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik, auf die hier am Beispiel hochintegrierter ONUs für optische Access-Netzwerke eingegangen werden soll.

3. KONZEPT UND REALISIERUNG EINER ONU FÜR WDM PON AUF BASIS EINER HYBRIDEN INP/POLYMER-INTEGRATIONSTECHNOLOGIE

3.1 Aufbau

Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau einer mit PolyBoard-Plattform realisierten ONU.

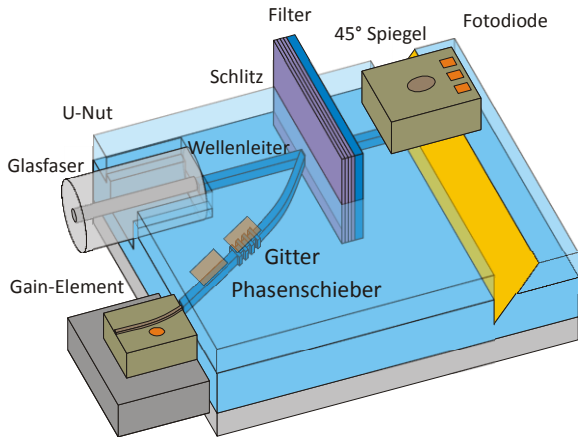


Abb. 2: Schematischer Aufbau einer PolyBoard-ONU.

Der ONU-Chip verfügt über eine integrierte U-Nut zur passiven Glasfaserkopplung, einen Dünnschichtfilter zur Trennung von empfangenen und gesendeten Datenströmen, eine Fotodiode zur Detektion des von der OLT kommenden hochbitratigen Datensignals sowie über einen direktmodulierbaren, weit abstimmbaren InP/Polymer-Laser zum Senden der Daten an das OLT. Aufbau und Funktionsweise der einzelnen Komponenten sowie die Integration in die PolyBoard-Plattform werden im Folgenden näher erläutert.

3.2 U-Nut zur passiven Faser/Chip-Kopplung

Beim Aufbau von optischen Bauelementen stellt die Ankopplung der Monomode-Fasern an die integrierten Wellenleiter der Opto-Chips eine besondere Herausforderung dar, weil hierfür eine Präzision im Submikrometer-Bereich erforderlich ist. Dies trägt u. a. dazu bei, dass bei optischen Komponenten ca. 70% bis 80% der Modulkosten auf die Kosten für die Aufbau- und Verbindungstechnik entfallen.

Abbildung 3(a) zeigt eine in einen Polymerchip geätzte U-Nut. Auf Grund der exakten Geometrie der U-Nut wird beim Einbringen der Glasfaser der Faserkern perfekt (passiv) vor dem Wellenleiter ausgerichtet. Auf diese Weise lässt sich die geforderte Präzision bei der Faser/Chip-Kopplung von der rein manuellen Adjustage auf die genaue

Prozessierung auf Wafer-Ebene verlagern. Abbildung 3(b) zeigt beispielhaft ein Wafer-Mapping geätzter U-Nuten über einen 4"-Wafer, wobei die grünen Flächen einer Abweichung von weniger als $1\ \mu\text{m}$ von der Zieltiefe entsprechen. Diese Chips wären demnach für eine effiziente passive Faser/Chip-Kopplung geeignet.

3.3 Dünnschichtfilter

Eine Vielzahl von optischen Filterfunktionen wird innerhalb der PolyBoard-Plattform mittels Dünnschichtelement realisiert. Die Dünnschichtfilter bestehen aus einem Paket dielektrischer Schichten auf einem Polymersubstrat und haben Dicken zwischen $10\ \mu\text{m}$ und $20\ \mu\text{m}$. Durch das Design der dielektrischen Schichten lassen sich die unterschiedlichsten Filterfunktionen (Kanten- und Bandpassfilter) realisieren, aber auch sehr effektive Polarisationsfilter herstellen. Die Dünnschichtfilter werden in senkrecht zur Wellenleiterebene geätzte bzw gesägte Schlitz eingebracht und mit UV-Kleber fixiert. So lassen sich Design der Wellenleiternetzwerke und Filterdesign entkoppeln und unabhängig voneinander optimieren.

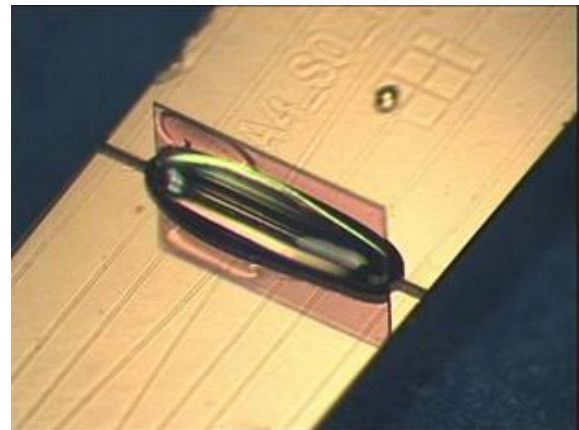


Abb. 4: In ein PolyBoard-Chip integriertes Dünnschichtfilter.

In der ONU findet ein Kantenfilter Verwendung, das den von der ONU gesendeten Datenstrom im C-Band ($1550\ \text{nm}$) von dem von dem OLT im L-Band ($1600\ \text{nm}$) gesendeten Datenstrom trennt.

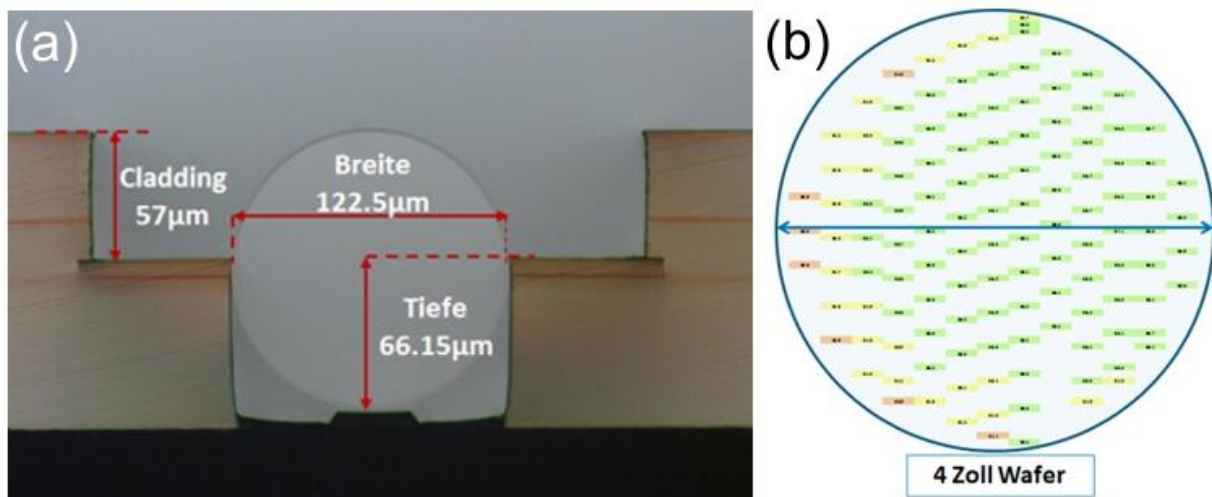


Abb. 3: Querschnitt einer U-Nut zur passiven Faser/Chip-Kopplung (a) und Verteilung der U-Nut-Tiefe über einem 4-Zoll-Wafer (b). Grüne Flächen stehen für eine Abweichung kleiner als $1\ \mu\text{m}$ von der Zieltiefe, gelbe Flächen für Abweichungen zwischen $1\ \mu\text{m}$ und $2\ \mu\text{m}$ und rote Flächen für Abweichungen größer als $2\ \mu\text{m}$.

3.4 Ankopplung von Fotodioden

Die Detektion von Datensignale erfolgt in PolyBoard mit Hilfe von rückseitenbeleuchteten Photodetektoren. Diese haben, je nach Anwendungsbereich, Bandbreiten zwischen 2,5 GHz und 30 GHz und können entweder als Einzeldioden oder in Array-Form integriert werden.

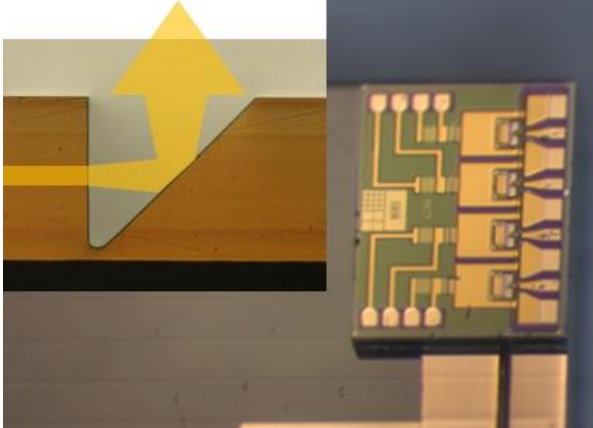


Abb. 5: Auf einem integrierten 45°-Spiegel fixiertes 4er-Fotodioden-Array mit einer Grenzfrequenz von 25 GHz. Der Inset zeigt einen hergestellten 45°-Spiegel und deutet die 90°-Umlenkung der Lichtausbreitung an.

Die Fotodioden werden, wie in Abbildung 5 gezeigt, auf Umlenkspiegel aufgebracht, die im Polymer-Chip integriert sind. Diese Spiegel haben eine senkrechte Flanke, an der das im Wellenleiter geführte Licht austritt und eine metallisierte, im 45°-Winkel eingebrachte Flanke, die das Licht um 90° nach oben ablenkt und damit senkrecht zur Wellenleiterebene aus dem Polymerchip austreten lässt. So kann das Licht mittels planarer Fotodioden(arrays) detektiert werden, die direkt auf dem Polymerchip aufgebracht sind, was u.a. die anschließende elektrische Kontaktierung stark vereinfacht. Im Falle der ONU wird eine Fotodiode mit einer Bandbreite von 2,5 GHz verwendet, die auf Grund ihrer relativ großen aktiven Fläche (80 μm) mittels passiver Pick-and-Place-Technik über dem 45°-Spiegel ausgerichtet wird. So lassen sich Koppelverluste von ca. 1 dB von Wellenleiter zur Fotodiode erzielen.

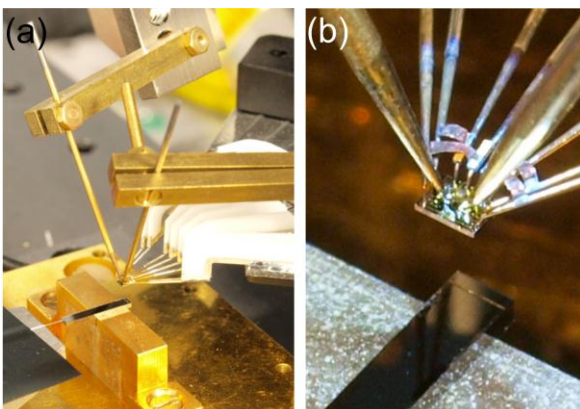


Abb. 6: Koppelplatz für die aktive Ausrichtung breitbandiger Fotodioden-Arrays (a) und die Positionierung eines 4er-Fotodioden-Arrays über einem Polymerchip mit integriertem 45°-Spiegel. Das Fotodioden-Array wird mittels UV-Kleber an zwei Trägernadeln fixiert, wobei zeitgleich alle vier Fotodioden kontaktiert sind.

3.5 Durchstimmbare Laser

Zwei wesentliche Beiträge zur Kostensenkung in zukünftigen optischen Zugang-Netzen sind i) mittels Wellenlängenmultiplex (WDM) virtuelle Verbindungen zwischen ONUs und OLT zu realisieren, die die Übertragungskapazität der Glasfasern effektiver nutzen und ii) allen Endkunden gleichartige Transceiver-Chips zu geben, die ihre Datensignale allerdings auf unterschiedlichen Wellenlängenkanälen an das OLT senden, die jedem Nutzer eindeutig zugewiesen werden. Das Schlüsselement derartiger ONUs („Colorless Transceiver“) ist ein durchstimmbarer Laser, der in PolyBoard vorteilhaft als hybrider InP/Polymer-Laser realisiert werden kann.

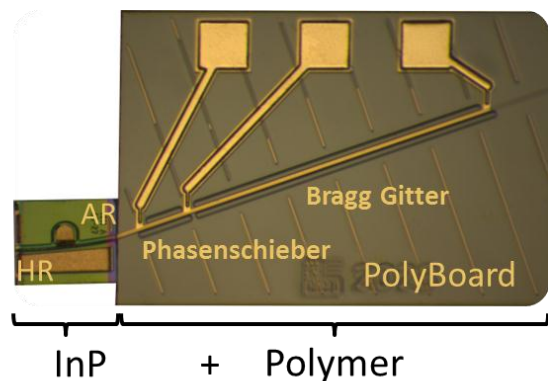


Abb. 7: Aufbau eines durchstimmbaren Lasers in hybrider InP/Polymer-Integrationstechnologie PolyBoard. Der Laser besteht aus einem InP-(Gain)Chip und einem polymeren Bragg-Gitter mit Phasensektion. Mittels integrierter Heizelektroden können Bragg- und Phasensektion effektiv verstimmbar werden, was zu einer Verschiebung der Laserwellenlänge führt.

Wie Abbildung 7 zeigt, besteht der durchstimmbare Laser aus einem (aktiven) InP-(Gain)Chip zur Verstärkung im Laserresonator und einem (passiven) Polymer-Chip mit Bragg-Gitter, Phasensektion und Heizelektroden als Wellenlängenbestimmendes Element. Die eine Facette des InP-(Gain)Chips ist hochreflektierend verspiegelt (HR), die andere Facette (AR) ist gegenüber dem Brechungsindex des hier verwendeten Polymers ($\sim 1,47$) entspiegelt. Auf der Seite des Polymer-Chips besteht der Laserresonator aus einer Bragg-Gitter-Sektion und einer Phasensektion. Beide Sektionen können über Elektroden geheizt, d.h. in ihrem Brechungsindex effektiv verstimmbar werden.

Die Kopplung zwischen InP-(Gain)Chip und Polymer-Chip erfolgt stirnflächig mit Hilfe eines automatisierten Algorithmus. Dieser nähert die beiden Chips einander an, wobei die Ausrichtung der Wellenleiter zueinander stetig optimiert wird. Ist der Kontakt zwischen beiden Chips hergestellt, stoppt der Koppelalgorithmus und die Position wird mit Hilfe von UV-Kleber fixiert. Mit dieser automatisierten Vorgehensweise lassen sich Koppelverluste zwischen 1,0 und 1,5 dB erzielen.

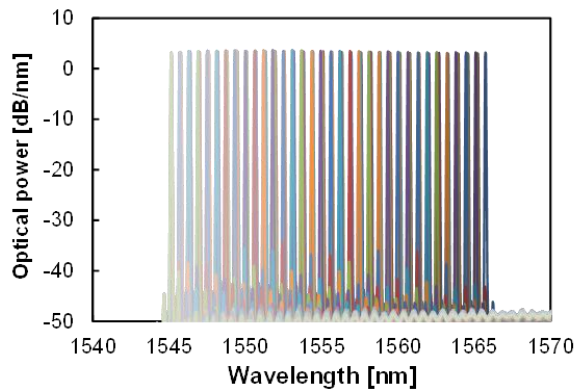


Abb. 8: Optische Ausgangsspektren eines abstimmbaren PolyBoard-Lasers mit Emissionswellenlängen zwischen 1545 nm und 1565 nm.

Die Durchstimmbarkeit derartiger hybrider InP/Polymer-Laser beruht auf der effektiven Erwärmung der Bragg-Gitter-Sektion durch die integrierten Heiz-Elektroden. Wegen des großen thermo-optischen Koeffizienten von Polymer ($-1,14 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$) in Verbindung mit der geringen Wärmeleitfähigkeit ($0,3 \text{ W/m/K}$) lässt sich der Brechungsindex der Polymerwellenleiter effizient und lokal begrenzt verändern. Das Aufheizen des im Polymerwellenleiter integrierten Bragg-Gitters führt zu einer Verschiebung der vom Bragg-Gitter reflektierten Lichtwellenlänge und damit zu einer Verstimmung der Laserwellenlänge. Die erzielbare Wellenlängenverschiebung in Abhängigkeit von der eingepprägten Temperatur bzw. elektrischen Heiz-Leistung an Elektrode beträgt bei dieser Konfiguration ca. $0,52 \text{ nm/K}$. Mit einem derartigen Laser lässt sich ein Durchstimmbereich von über 50 nm erzielen. Im praktischen Einsatz jedoch werden Werte um 20 nm angestrebt, um jedwede Gefahr von Alterung ausschließen zu können. In umfangreichen Langzeittests ($>10.000\text{h/Modul}$) hat sich gezeigt, dass sich diese Laser im Bereich um 20 nm gefahrlos betreiben lassen (Abbildung 9). Wird ein größerer Abstimmbereich (z.B. 40 nm) gefordert, lassen sich zwei derartige Laser zu einer Dual-Laser-Konfiguration zusammenschalten (Abbildung 10).

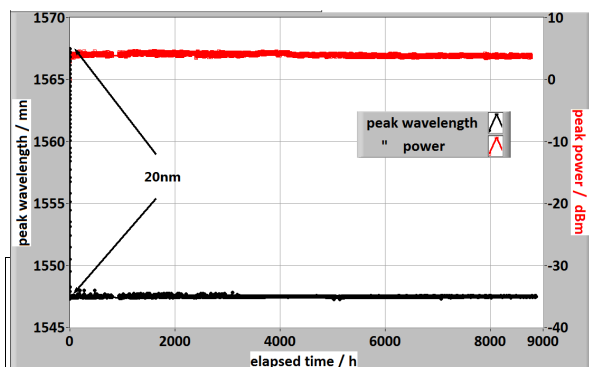


Abb. 9: Ergebnis nach ca. 9.000h im Dauertestbetrieb. Wellenlänge (schwarze Kurve) und Ausgangsleistung (rote Kurve) des abstimmbaren Lasers sind stabil.

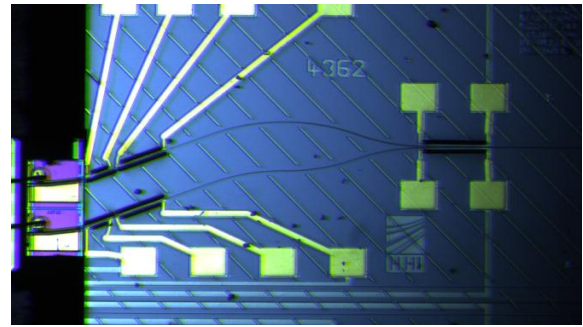


Abb. 10: Aufbau eines abstimmbaren Lasers für 40nm. Er besteht aus einem Dual InP-(Gain)Chip und einem Polymer-Chip mit Dual Bragg-Sektion, für 1530-1550nm (Bragg-1) und 1550-1570nm (Bragg-2). Zusätzlich ist ein 1x2-Schalter integriert, der den jeweils gewünschten Wellenlängenbereich auf die Ausgangsfaser schaltet.

3.6 Optical Network Unit (ONU) für WDM PON

Die vorgestellten Elemente und Funktionen der Technologieplattform wurden im Rahmen des Ausbaus der PolyBoard-Technologie unabhängig voneinander entwickelt und optimiert und können sehr einfach zu komplexen optischen Schaltkreisen integriert werden. Dieses Konzept erlaubt beispielsweise die Herstellung integrierter ONUs für optische Zugangsnetze mit einem verhältnismäßig geringen Entwicklungsaufwand.

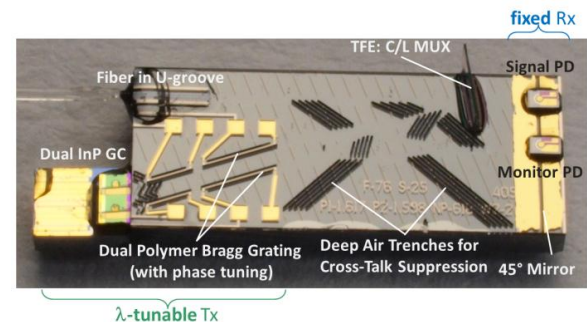


Abb. 11: Assemblierte ONU mit U-Nut, Dünnfilmfilter, gekoppelten Photodioden sowie zwei hybriden durchstimmbaren InP/Polymer Lasern.

Die in der Abbildung 11 gezeigte assemblierte ONU besteht im Wesentlichen aus den bereits vorgestellten Komponenten: Abstimmbarer Laser, Dünnfilmfilter zur Kanaltrennung, 45°-Spiegel mit Fotodiode für das Empfangssignal und U-Nut zur passiven Faser/Chip-Kopplung. Zudem ist eine Monitor-Diode für die Überwachung der Laserleistung integriert und mehrere tief in den Polymer-Chip geätzte Schlitze zur Reduktion des optischen Übersprechens zwischen den beiden Signalpfaden. Es wurden zwei abstimmbare Laser integriert. Dies erlaubt die wellenlängenmäßige Abdeckung des gesamten C-Bands mit einer einzelnen ONU ohne eine signifikante Vergrößerung der Chip-Komplexität [4].

4. AUSBLICK: INTEGRATION VON 3D-STRUKTUREN

Das Integrationskonzept der PolyBoard-Plattform ist nicht auf rein 2-dimensionale Wellenleiterstrukturen beschränkt. Da die Herstellung der PolyBoard-Komponenten auf einer relativ einfachen Prozessführung beruht (Aufbringen der Wellenleiter- und Cladding-Ebenen mittels Spin-Coating, Strukturierung mittels RIE oder ICP), ist die PolyBoard-Plattform prädestiniert für die Herstellung optischer Multi-Schichten bzw. 3D-Strukturen. Bereits entwickelte Funktionen der PolyBoard-Plattform können hierbei mit geringem Aufwand auf diese 3-dimensionalen Strukturen übertragen werden. Damit sind völlig neuartige Sender- und Empfängerstrukturen für zukünftige Datennetze denkbar.

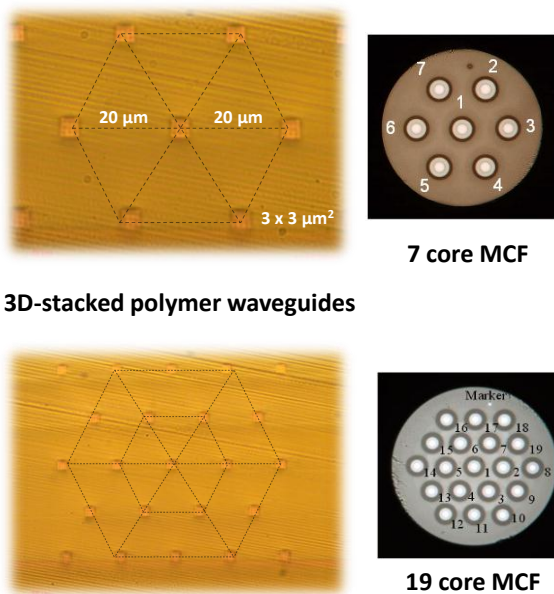


Abb. 12: Auf Basis der PolyBoard-Plattform hergestellte Mehrschicht-Strukturen mit drei (oben) bzw. fünf (unten) Wellenleiterebenen und einem konstanten Wellenleiterabstand von 20 µm zur Ankopplung an Multikernfasern mit 7 bzw. 19 Faserkernen (singel mode).

Eine mögliche Anwendung, die in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit erfahren hat, ist die Datenkommunikation über Multikernfasern. Die Multikernfasern bieten den Vorteil einer deutlich gesteigerten Übertragungskapazität im Vergleich zu herkömmlichen Glasfasern, da die Datenströme über jeden Faserkern unabhängig voneinander und auch mit unterschiedlichen Modulationsformaten übertragen werden können. Zudem schützen die äußeren Kerne einer Multikernfaser den inneren Kern vor einem unbefugten Abgreifen des Datensignals auf der Faserstrecke durch Dritte. Die größte Herausforderung besteht jedoch in der Ankopplung derartiger Multikernfasern an die üblichen 2-dimensionalen Sendeelemente wie Laser- und Fotodioden. Der in Abschnitt 3.4 vorgestellte 45°-Spiegel bietet hier einen attraktiven Lösungsansatz.

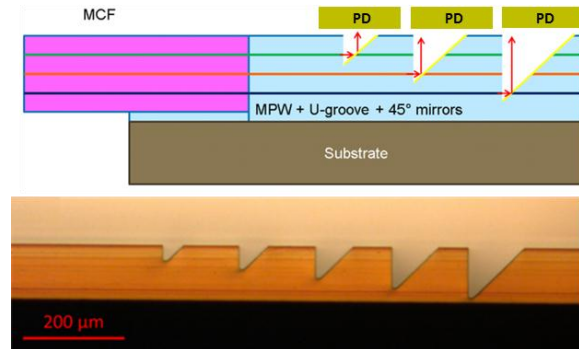


Abb. 13: Schematische Darstellung der Ankopplung einer Multikernfaser an einen 3D-PolyBoard-Chip mit integrierten 45°-Spiegeln zur Ankopplung an planare Fotodioden-Arrays (oben) bzw. VCSEL. Hergestellter PolyBoard-Chip mit fünf Wellenleiterebenen und jeweils einem integrierten 45°-Spiegel zur Lichtaus/einkopplung (unten).

Hierzu werden, wie in Abbildung 13 gezeigt, mehrere 45°-Spiegel mit abgestufter Tiefe in einen Multi-Ebenen-PolyBoard-Chip eingebracht. Jeder dieser Spiegel koppelt das Licht aus seiner Wellenleiterebene nach oben aus von wo es mittels einer Fotodiode bzw. einem Fotodioden-Array detektiert wird. Die Koppelverluste die auf diese Weise realisiert wurden liegen zwischen 1.4 dB und 2.0 dB, abhängig von der Tiefe des entsprechenden Spiegels [5]. VCSEL vice versa.

5. FAZIT

Am Beispiel einer ONU für zukünftige optische Zugangsnetze wurde gezeigt, wie die PolyBoard-Plattform als optische Motherboard Technik bei der Entwicklung neuer Komponenten auf die Vorteile der hybriden Integrationstechnologie zurückgreift. Dies erlaubt die unabhängige Entwicklung und Optimierung einzelner Funktionen sowie den Einsatz der für die gegebene Aufgabe am besten geeigneten Komponenten. Zudem wurde gezeigt, wie die bereits entwickelten Funktionen flexibel zu neuartigen 3D-Mehrschicht-Strukturen kombiniert werden können, um attraktive Lösungsansätze für die Daten-Netze der Zukunft bereitzustellen.

REFERENZEN

- [1] Cisco Systems, "The Zettabyte Era: Trends and Analysis," White paper, (2014).
- [2] Kramer, G., and Pesavento, G., "Ethernet passive optical network (EPON): building a next-generation optical access network," Communications magazine, IEEE, 40(2), 66-73, (2002).
- [3] Keil, N., Zawadzki, C., Zhang, Z., Wang, J., Mettbach, N., Grote, N. and Schell, M., "Polymer PLC as an Optical Integration Bench," Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011, OWM1 (2011).
- [4] Zhang, Z., Felipe, D., Brinker, W., Kleinert, M., Maese-Novo, A., Moehrle, M., Zawadzki, C. and Keil, N., "Bidirectional, Crosstalk-Suppressed, 40-nm Wavelength Tuneable Colourless ONU on Polymer Platform," Proc. Of the 40th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2014), Mo.4.4.4 (2014).
- [5] Zhang, Z., Kleinert, M., Maese-Novo, A., Irmischer, G., Schwartz, E., Zawadzki, C. and Keil, N., "Multicore Polymer Waveguides and Multistep 45° Mirrors for 3D Photonic Integration," IEEE Photon. Technol. Lett. 26(19), 1986-1989 (2014).