



Doctoral Thesis

Fabrication and System Integration of Single-Mode Polymer Optical Waveguides

Author(s):

Zraggen, Eugen

Publication Date:

2014

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010294040> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 22163

Fabrication and System Integration of Single-Mode Polymer Optical Waveguides

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Science

presented by
EUGEN ZGRAGGEN
MSc EEIT ETH Zurich
born 21 November 1984
citizen of Silenen - Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Gian-Luca Bona, examiner
Prof. Dr. Juerg Leuthold, co-examiner
Dr. Bert Jan Offrein, co-examiner
Dr. Urs Sennhauser, co-examiner

2014

Abstract

The emergence of ever new user applications and advances in computing technology drive the growth of computational power and interconnection bandwidth. While traditionally down-scaling of the chip dimensions was sufficient to satisfy these needs, integration and interconnection aspects nowadays become more important as traditional electrical interconnects approach their performance limits. Since the 1980s, single-mode optical fibers have dominated the market for long distance optical communication. Current research efforts focus on short distances (mm – m) with optical technologies such as single- and multimode integrated polymer waveguides or active optical cables, as well as on very short distances (μm – mm) with silicon photonics.

In the present work, we identified direct laser written single-mode polymer waveguides as a promising solution for board-level optical interconnects with distances of cm – m. We demonstrate a range of building blocks to show the potential of the proposed waveguide technology. The success of this optical technology is, besides performance and reliability measures, mainly dependent on the implementation cost. A cheap fabrication technology, as well as smart and simple coupling concepts to active devices (e.g., lasers or photodetectors), to devices made in other fabrication technologies (e.g., silicon photonics chips) and to single-mode fibers (SMF) have to be available.

We studied two direct UV-patternable polymer materials, namely acrylates during the initial process development phase and polysiloxanes for the device fabrication. Together with Dow Corning Corporation, a novel polysiloxane material was developed with absorption losses as low as 0.2 dB/cm at the wavelength of 1.3 μm . Laser direct writing was selected as the most advantageous micro-patterning technique. Characteristics of laser writing include high flexibility, fast prototyping, scalability to large substrates and local position accuracy with respect to substrate.

By using a custom-built laser direct writing setup and optimizing the writing modes and fabrication parameters, we achieved the controlled fabrication of single-mode waveguides. A propagation loss of 0.28 dB/cm at the wavelength of 1.3 μm was achieved, including 0.2 dB/cm intrinsic material loss. We manufactured a range of well performing passive devices, including y-splitters, directional couplers, multimode interference

couplers and, for the first time with laser direct writing, an arrayed waveguide grating. The proper device functionalities and performances prove the feasibility of fabricating complex high-performance optical structures by laser direct writing.

We propose a novel integration concept of single-mode vertical cavity surface emitting lasers and polymer waveguides around the wavelength of 1.55 μm . The concept benefits from the unique advantages of the laser direct writing systems. By combining the writing head with a vision detection system, the waveguides were fabricated with a μm -accuracy relative to a VCSEL array, while using the contacts of the VCSEL as alignment marks. An estimated loss between 1.1 dB and 3.9 dB resulted as a combination between measured performance and simulated loss numbers.

When polymer materials are considered in optics, their reliability is often the decisive factor for the viability of the material. We performed a set of environmental tests on the polysiloxane materials and waveguide devices, including a relevant solvent compatibility study during the manufacturing process, a damp-heat test (85°C / 85% RH test conditions for 1000 h) and a temperature cycling test (with maximum temperature differences of 70°C). Neither the propagation loss nor the coupling ratio of a directional coupler showed significant changes during these tests.

We then developed a simple pluggable optical connector to interface the polymer waveguides with single-mode fibers. The concept relied on the accurate fabrication of alignment structures in the same fabrication step and layer as the core of the polymer waveguide. These sub- μm -precise alignment structures guided the placement of a silicon v-groove with a single-mode fiber embedded. A fiber-to-waveguide connector loss of 1.5 dB was measured.

All these building blocks combined show the potential of the proposed waveguide technology for the use in optical interconnects and potentially in other applications, such as sensing.

Zusammenfassung

Neue Benutzeranwendungen und Computertechnologien treiben das stete Wachstum von Rechenleistung und Verbindungsbandbreite. Traditionell genügte das Verkleinern der Chipdimensionen, um dieses Wachstum aufrechtzuerhalten. Heutzutage werden jedoch die Systemintegration und die Verbindungstechnik wichtiger, zumal elektrische Verbindungen an ihre Leistungsgrenzen stossen. Seit den 1980er Jahren dominieren optische Monomode-Glasfasern den Markt für Langdistanzkommunikation. Aktuelle Forschungsanstrengungen im Bereich der optischen Kommunikation konzentrieren sich auf kürzere Distanzen. Dabei kommen integrierten Mono- oder Multimode-Polymerwellenleitern oder aktive optische Kabel zur Anwendung (mm–m), als auch Siliziumphotonik für sehr kurze Distanzen (μm –mm).

In dieser Arbeit identifizierten wir laserdirektgeschriebene Monomode-Wellenleiter in Polymer als vielversprechende Lösung für optische Verbindungen auf Boardlevel (cm–m). Der Erfolg der Technologie ist, neben der Leistungsfähigkeit und der Zuverlässigkeit der Komponenten, vor allem von den Umsetzungskosten abhängig. Diese Kosten können durch eine billige Herstellungsmethode und einfache Systemintegrationsmöglichkeiten tief gehalten werden. Dabei ist die Verfügbarkeit von intelligenten und einfachen Kopplungskonzepten zu aktiven Komponenten (z.B. Laser oder Fotodetektoren), zu Komponenten gefertigt in anderen Technologien (z.B. Silizium-Photonik-Chips) und zu Monomode-Glasfasern entscheidend.

Wir untersuchten zwei verschiedene UV-direktstrukturierbare Polymermaterialien, darunter ein Akrylat für erste Entwicklungsschritte und ein Polysiloxan für die Komponentenfabrikation. Zusammen mit der Firma Dow Corning Corporation wurde ein neuartiges Polysiloxan-Material entwickelt (intrinsische Materialdämpfung von 0.2 dB/cm bei einer Wellenlänge von 1.3 μm). Als Mikrostrukturierungsmethode wählten wir Laserdirektschreiben, da diese Technik die folgenden Vorteile aufweist: hohe Flexibilität, schnelle Entwicklung von Prototypen, Skalierbarkeit auf grosse Substrate und lokale Positioniergenauigkeit relativ zum Substrat.

Für die kontrollierte Fabrikation von Monomode-Wellenleitern verwendeten wir eine selbst entwickelte Laserdirektschreibanlage. Mit der Optimierung von Schreibmodi

und Herstellungsparametern erreichten wir Wellenleiter mit Ausbreitungsverlusten von 0.28 dB/cm bei einer Wellenlänge von 1.3 μm . Dabei konnten 0.2 dB/cm der intrinsischen Materialabsorption zugeschrieben werden. Damit konnten wir die erfolgreiche Herstellung einer Reihe von passiven Wellenleiterkomponenten demonstrieren. Folgende Komponenten wurden untersucht: Y-Splitter, Richtkoppler, Multimode-Interferenzkoppler und, erstmals mit Laserdirektschreiben, Arrayed-Waveguide Gratings. Die gezeigten Funktionalitäten und Komponentencharakteristiken beweisen die Eignung des Laserdirektschreibens als Herstellungsmethode für komplexe optische Hochleistungsstrukturen.

Wir entwickelten ein neuartiges Integrationskonzept von monomodigen Oberflächenemissionslasern (VCSEL) mit den Polymerwellenleitern im Wellenlängenbereich von 1.55 μm . Wir machten uns dabei die einzigartigen Vorteile des Laserdirektschreibens zu Nutze: durch die Kombination des Schreibkopfs mit einer hochauflösenden Kamera wurden die Wellenleiter mit einer Genauigkeit im Submikrometerbereich relativ zu den VCSEL-Arrays positioniert. Die Kontakte der VCSEL dienten als Ausrichtungsmarken. Ein geschätzter Gesamtverlust zwischen 1.1 dB und 3.9 dB wurde ermittelt, bestehend aus einer Kombination zwischen gemessenen und simulierten Verlustwerten.

Die Zuverlässigkeit von Optikpolymeren ist oft der entscheidende Faktor für die Eignung des Materials für eine spezifische Anwendung. Eine Reihe von Zuverlässigkeitsuntersuchungen wurden durchgeführt mit den Wellenleitern und -komponenten, einschliesslich einer Prüfung der Lösungsmittelverträglichkeit, einem Feuchtigkeits-/Temperaturtest und einem Versuch mit Temperaturzyklen. Während dieser Tests wiesen weder die Dämpfung, noch das Kopplungsverhältnis eines Richtkopplers signifikante Änderungen auf.

Zudem entwickelten wir eine simple optische Verbindungsschnittstelle zwischen den Polymerlichtwellenleitern und Monomode-Glasfasern. Das Konzept beruhte auf der präzisen Herstellung von Alignierstrukturen. Diese Strukturen wurden im gleichen Prozessschritt und in der gleichen Materialschicht wie der Wellenleiterkern fabriziert, um eine relative Positioniergenauigkeit im Submikrometerbereich zu ermöglichen. Diese hochpräzisen Alignierstrukturen erlaubten die Platzierung einer V-förmigen Fuge aus Silizium, in der eine Glasfaser eingebettet war. Ein Faser-Wellenleiter-Kopplungsverlust von 1.5 dB wurde gemessen.

Die Kombination aller dieser Bausteine zeigt das Potential der vorgestellten Wellenleitertechnologie für die Verwendung in der optischen Datenkommunikation und potentiell in anderen Anwendungsgebieten, wie z.B. in der Sensorik.