

Trotz des rasanten Ausbaus der schnurlosen (Wireless) Netze geht parallel dazu der Trend zum optischen Netzwerk mit Glasfaseranbindung bis zum privaten Endnutzer (Abb. 1)

Vorreiter bei dieser Technologie ist Japan mit seiner National Broadband Initiative. Bis 2005 sollen über 7 Millionen private Haushalte mit einem Hochgeschwindigkeitsglasfaseranschluß (FTTH = Fibre To The Home) versorgt werden. Zunächst ist ein rein passives optisches Verteilnetz mit integrierten 1xN-Splitttern geplant. FTTH-Netze werden zukünftig auch verstärkt in Europa zum Einsatz kommen.

Die Glasfaser hat eine immens hohe Datenübertragungskapazität. Theoretisch könnten über eine hauchdünne Glasfaser sämtliche weltweit stattfindenden Telefongespräche gleichzeitig übertragen werden. Ein optisches Netzwerk benötigt jedoch nicht nur Glasfasern sondern auch eine Reihe von integrierten optischen Komponenten wie Schalter, Splitter, Multiplexer, Demultiplexer, Laser etc. Voraussetzung für die Installation von FTTH-Netzen bis zum Endnutzer ist es deshalb, solche Komponenten kostengünstig zu produzieren. Die Polymertechnik kann hier wertvolle Beiträge leisten.

2. Anforderungen an Polymere für die Integrierte Optik

Zur Anwendung von Polymeren für integrierte optische Komponenten sind eine Reihe von Anforderungen zu erfüllen (Abb. 2).

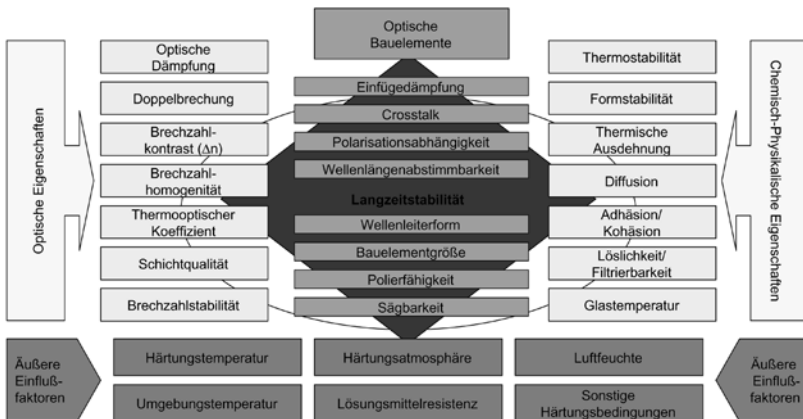


Abb. 2: Anforderungen an Polymere für optische Bauelemente.

Eine Schlüsselgröße ist die optische Dämpfung in den für die Telekommunikation relevanten Wellenlängenbereichen. Die Glasfaser hat drei sogenannte Telekommunikationsfenster in den Wellenlängenbereichen um 850, 1300 und 1550 nm. Ursache für diese Telekommunikationsfenster ist zum einen die niedrige Absorption der Glasfaser in diesen Bereichen und die Verfügbarkeit von Laserquellen für diese Wellenlängenbereiche. Für die Langstreckendatenübertragung relevant ist insbesondere das Telekommunikationsfenster um 1550 nm. Eine Reihe von Polymeren kommt für diesen Wellenlängenbereich nicht in Frage, da hier OH- und NH-Bindungen und Wasser, in geringerem Maße auch CH-Bindungen absorbieren. Um die optische Dämpfung zu senken, ist somit die Vermeidung von NH- und OH-Bindungen sowie die Reduzierung des Anteiles an CH-Bindungen essentiell. Die Substitution von CH-Bindungen gegen CF-Bindungen senkt die optische Dämpfung, allerdings wird durch hohe Fluorgehalte auch die Löslichkeit und insbesondere die Haftung vermindert.

Für komplexere integrierte Bauelemente sind optische Dämpfungen von $< 0,3 \text{ dB/cm @ 1550 nm}$, besser $< 0,1 \text{ dB/cm @ 1550 nm}$ erforderlich.

Die Herstellung von Wellenleitern erfolgt in der Regel durch Aufbringen einer unteren Passivierungsschicht (typische Dicke für Monomode-Wellenleiter $15 \mu\text{m}$) auf ein Substrat. Eine einfache Technologie hierfür ist das Spin-Coating-Verfahren. Das aufzubringende Polymer muß hierzu in einem geeigneten Lösungsmittel löslich sein. Anhand der Lösungsviskosität und der Umdrehungsgeschwindigkeit kann die Schichtdicke sehr homogen und definiert eingestellt werden. Diese Schicht muß, um Stabilität für die weiteren Prozessschritte zu gewährleisten, vernetzt werden (thermisch oder strahlenchemisch). Im weiteren wird eine zweite Schicht, die Wellenleiterschicht, aufgebracht (typische Schichtdicke $5\text{-}7 \mu\text{m}$). Deren Brechungsindex muß höher als der der Passivierungsschicht sein, abhängig von der Art des Bauelements und vom Bauelementedesign. Diese Wellenleiterschicht wird strukturiert, beispielsweise unter Verwendung einer aufgedampften Metallmaske mittels RIE (Reactive Ion Etching, Reaktives Ionenätzen). Schließlich wird eine obere Passivierungsschicht aufgebracht, deren Brechungsindex wiederum etwas niedriger als der der Wellenleiterschicht sein muß.

Das zur Herstellung dieser Wellenleiterstrukturen verwendete Polymersystem muß folglich einen exakt reproduzierbaren definierten Brechungsindex über die gesamte Fläche der Schicht gewährleisten. Zudem ist der zwischen Wellenleiterschicht und Passivierung geforderte Indexkontrast zu erzielen. Die Schichtbildung und die Strukturierung hat defektfrei zu erfol-

gen; auch die Haftung der Schichten untereinander und auf dem Substrat muß ausreichend sein. Hohe Anforderungen werden auch an die Stabilität der Polymere gestellt, da diese während der ganzen Lebensdauer des Bauelementes über einen Temperaturbereich von -40 bis $+85^{\circ}\text{C}$ ihre optischen Eigenschaften nicht ändern dürfen, auch müssen sie ihre Feuchtestabilität bei 85°C und 85% relativer Feuchte beweisen. Für polarisationsempfindliche Bauelemente wie AWGs (Arrayed Waveguide Gratings) sind niedrige Doppelbrechungen ($< 10^{-4}$) erforderlich.

Das Erreichen eines möglichst optimalen Eigenschaftsprofils stellt somit eine hohe Herausforderung an die Materialentwickler dar.

3. Polycyanurate und andere triazinhaltige Polymere als Wellenleitermaterialien

Die oben genannten Anforderungen an Optikpolymere schränken die Auswahl an Polymerklassen bereits erheblich ein. Von den in Frage kommenden reaktiven Polymerklassen bieten sich die Polycyanurate besonders an, da weder die Monomere, noch die daraus resultierenden (Pre-)Polymere NH- oder OH-Bindungen enthalten.

IR-Spektroskopische Untersuchungen zeigen, daß Cyanat-Monomere und deren Polymere im Wellenlängenbereich um 1550 nm ein Absorptionsminimum – analog zum Telekommunikationsfenster der Glasfaser – aufweisen.

Eine Besonderheit der Cyanate ist, daß jeweils drei Monomere über Cyclootrimerisierung zum Triazinringen reagieren. Bei Verwendung von mindestens bifunktionellen Cyanaten bildet sich ein dreidimensionales dichtes Netzwerk aus. Abbildung 3 verdeutlicht diese Netzwerkbildung durch Polycyclootrimerisierung.

Durch Verwendung verschiedener Monomere können die Eigenschaften der Polycyanurate in einem weiten Bereich eingestellt werden. Verwendung von Monocyanaten als Coreaktanten führen zu einer Auflockerung des Netzwerkes und zu einer Absenkung der Glasübergangstemperatur T_g des resultierenden Polymers. Dies hat den Effekt, daß dämpfungserhöhende Nebenreaktionen unterdrückt werden. Auch kann der Fluorgehalt durch Verwendung hochfluorierter aliphatischer Monocyanate erhöht werden. Dadurch wird die optische Dämpfung von über 1,0 dB/cm auf unter 0,3 dB/cm @1550 nm gesenkt.

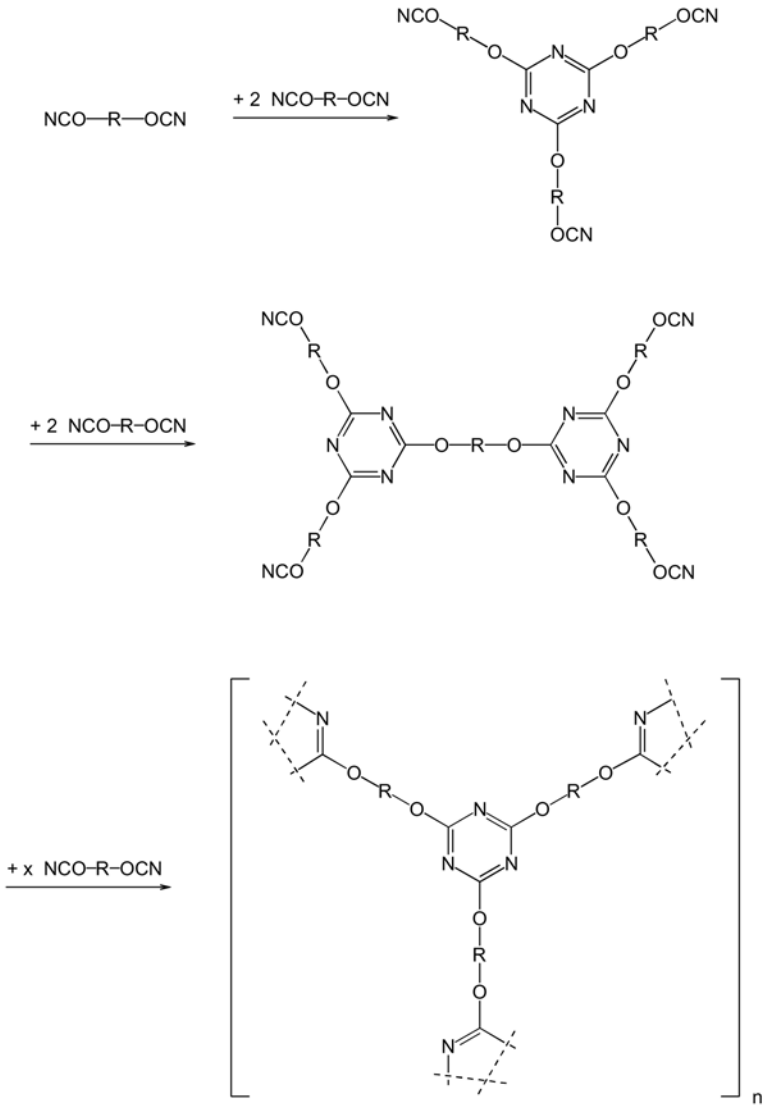


Abb. 3: Netzwerkbildung durch Polycyclotrimerisierung.

Die Erhöhung des Fluorgehaltes führt zu einer Erniedrigung des Brechungsindex, die Einführung höherer Halogene (Chlor, Brom) führt zu einer Erhöhung des Brechungsindex. Da sich eine große Zahl an Cyanatmonomeren in verschiedensten Verhältnissen miteinander copolymerisieren lassen, können die hieraus synthetisierbaren Polymere den Brechzahlbereich von 1,46 bis 1,59 stufenlos abdecken.

Polycyanuratnetzwerke können außerdem durch Copolymerisation mit Phenolen, sauren Alkoholen und Glycidylethern (mono- bzw. bifunktionell) modifiziert werden, was weitere Freiheitsgrade bei der Einstellung der Eigenschaften bedeutet.

Aufbauend auf den Polycyanuratpolymeren können triazinhaltige Prepolymere erhalten werden, deren Vernetzungsmechanismus über verschiedene reaktive Gruppen erfolgen kann, woraus eine wiederum erhöhte Strukturvariabilität folgt.

Die optische Dämpfung der Triazinpolymere liegt aktuell unter 0,3 dB/cm und wird weiter gesenkt werden.

4. Doppelbrechung von dünnen Polymerschichten.

Beide oben beschriebenen Polymerklassen – Polycyanurate und triazinhaltige Polymere – zeigen auf Silizium hohe Doppelbrechungen (typisch: 0,0025 – 0,0035) und sind deshalb in polarisationssensitiven Bauelementen nicht einsetzbar.

Die Doppelbrechung ist in erster Linie auf unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten (α) von Polymerschicht und Substrat zurückzuführen. Das Polymer wird bei hohen Temperaturen gehärtet. Dabei dehnen sich Siliziumsubstrat mit einem Ausdehnungskoeffizienten von ca. 4 ppm/K und Polymer mit 40 bis über 100 ppm/K unterschiedlich aus. Bei der Härtungstemperatur vernetzt das Polymersystem schließlich. Das Schichtsystem wird anschließend abgekühlt. Da Film und Substrat jedoch eine Einheit bilden (Das Polymer ist nach dem Vernetzungsprozeß auch bei erhöhter Temperatur nicht mehr flüssig) steht der Polymerfilm unter Zugspannung (σ_x), sobald die Temperatur unterhalb der Härtungstemperatur liegt (Gleichungen 1, 2).

$$\varepsilon_x = (\alpha_{Substrat} - \alpha_{Schicht}) \cdot \frac{\Delta T}{(1 - \nu)} \quad \text{Gleichung 1}$$

ν : *Poisonzahl*

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \quad \text{Gleichung 2}$$

E : Young's Modul

Diese Spannung induziert dann eine Doppelbrechung (Δn) in der Polymerschicht (Spannungsdoppelbrechung, Gleichung 3). Im Fall eines dünnen Substrates kann die durch die Spannung resultierende Kraft so stark sein, daß sich das Substrat in Richtung der Schicht konkav verformt. Die Größe der Doppelbrechung ist allerdings nicht nur von der Größe der Spannung im Polymerfilm abhängig, sondern auch von dem spannungsoptischen Koeffizienten C (Einheit: Brewster). Dieser ist eine intrinsische Materialeigenschaft, welcher für Polycyanurate vergleichsweise hohe Werte annimmt.

$$\Delta n = n_{TE} - n_{TM} = C \cdot \sigma_x \quad \text{Gleichung 3}$$

Für den Fall, daß der Polymerfilm einen höheren Ausdehnungskoeffizienten als das Substrat hat, ist das Resultat eine positive Doppelbrechung.

Folglich gibt es mehrere Möglichkeiten, die Doppelbrechung von Polymerwellenleitern zu reduzieren. Durch Änderung der Polymerstruktur des Wellenleiters kann dessen Ausdehnungskoeffizient reduziert werden und folglich auch die Doppelbrechung. Bei organischen Polymeren ist jedoch ein Ausdehnungskoeffizient in der Größenordnung von (anorganischem) Silizium nicht zu erzielen, weshalb der hieraus resultierende Effekt begrenzt ist. Durch Änderung der Polymerstruktur kann der spannungsoptische Koeffizient geändert werden. Auch die Senkung der Härtungstemperatur führt – gleiche Polymerstruktur vorausgesetzt – zu einer Reduzierung der Doppelbrechung.

Als bisher erfolgreichste Methode zur Reduzierung der Doppelbrechung hat sich die Anpassung der CTEs von Wellenleiter und Substrat herausgestellt.

Da Silizium für eine Reihe von passiven integrierten optischen Bauelementen wie Arrayed Waveguide Gratings als Substratmaterial nicht essentiell ist, können als Substratmaterialien Polymere zum Einsatz kommen. Diese Polymersubstrate müssen zum einen an den Ausdehnungskoeffizienten des Wellenleitermaterials angepaßt werden, zum anderen ist es erforderlich, daß sie auch den gesamten Strukturierungsprozeß der Wellenleiterstrukturen schadlos durchlaufen; ferner müssen sie eine Oberflächenqualität von optischer Güte erreichen. Das Substratmaterial muß Härtungstemperaturen von bis zu 250°C ohne Deformationen überstehen und resistent gegenüber den während des Strukturierungsprozesses mit ihm in Kontakt gebrachten Lösungsmitteln und Säuren sein.

Auf Basis von Polycyanuraten, Polycyanuratcopolymeren und weiteren High-Performance-Polymeren kann die Doppelbrechung einer Vielzahl der synthetisierten Wellenleitermaterialien auf Werte $< 0,0001$ reduziert werden. Hierbei ist zu erwähnen, daß jedes Wellenleitermaterial ein individuell CTE-angepaßtes Substrat benötigt, um polarisationsunabhängige Bauelemente zu erhalten. Es können auch negative Doppelbrechungswerte erzielt werden, indem der Ausdehnungskoeffizient des Substrates höher als der des Wellenleitermaterials gewählt wird.

5. Polymerbasierte integrierte optische Bauelemente

Aus den entwickelten Wellenleiter- und Substratmaterialien wurden in enger Kooperation vom Heinrich-Hertz Institut in Berlin integrierte optische Bauelemente hergestellt.

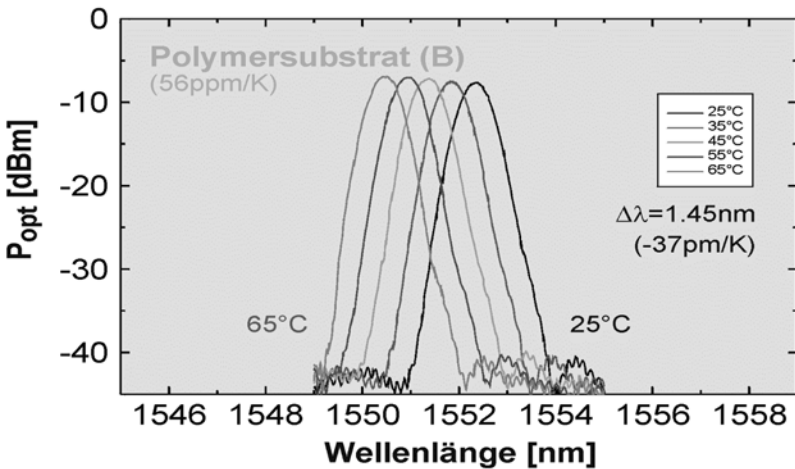
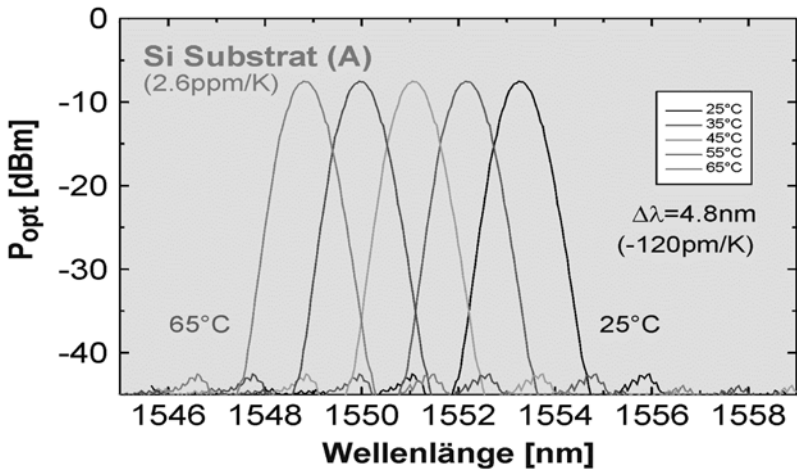
Beispielhaft zu nennen sind thermooptische Schalter. Für diese Anwendung bieten polymerbasierte Bauelemente einen deutlichen Vorteil gegenüber den herkömmlichen silica-basierten. Polymere haben einen ca. zehnfach höheren thermooptischen Koeffizienten als anorganische Materialien und nur ein Zehntel der Wärmeleitfähigkeit. Das Resultat hieraus ist, daß ein thermooptischer Schalter auf Polymerbasis nur 1/100 der Schaltleistung eines silica-basierten benötigt. Insbesondere bei großen Schaltmatrizen mit tausend oder mehr Schaltern kann somit die Wärmeabführung deutlich reduziert werden.

Komplexere, wenn auch passive Bauelemente sind AWGs (Arrayed Waveguide Gratings). Es handelt sich hierbei um Bauelemente, welche als Multiplexer, bzw. Demultiplexer fungieren können, d.h. diese Bauelemente können mehrere optische Datenströme zusammenfassen bzw. wieder auseinanderdividieren. Dieses Bauelement sortiert die Datenströme – ähnlich wie bei einem optischen Prisma – nach ihrer Wellenlänge.

AWGs sind wesentliche Bauelemente zur Erhöhung der Bandbreite und für Routing-Aufgaben.

Herkömmliche AWGs sind keine passiven Bauelemente, da deren Filterwirkung temperaturabhängig ist. Ein herkömmliches AWG muß deshalb mittels Peltierelementes und Regelkreis auf einer konstanten Temperatur gehalten werden, um zuverlässig unabhängig von der Umgebungstemperatur zu funktionieren. Auch AWGs mit Polymerwellenleitern auf Siliziumsubstraten zeigen eine Temperaturdrift, wie in Abbildung 4 gezeigt. Ersetzt man das Siliziumsubstrat durch Polymer, so reduziert sich die Temperaturdrift des Bauteiles erheblich. Durch exakte CTE-Anpassung des Polymersubstrates an den Wellenleiter wird dessen thermooptischer Koeffizient kompensiert. Die

Filterkurve verschiebt sich folglich nicht in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und eine Temperaturstabilisierung durch das Peltierelement entfällt. Eine kostengünstige Herstellung ist somit möglich. Dieses in Kooperation mit dem Heinrich-Hertz Institut hergestellte AWG ist das weltweit erste athermische AWG in Vollpolymerausführung.



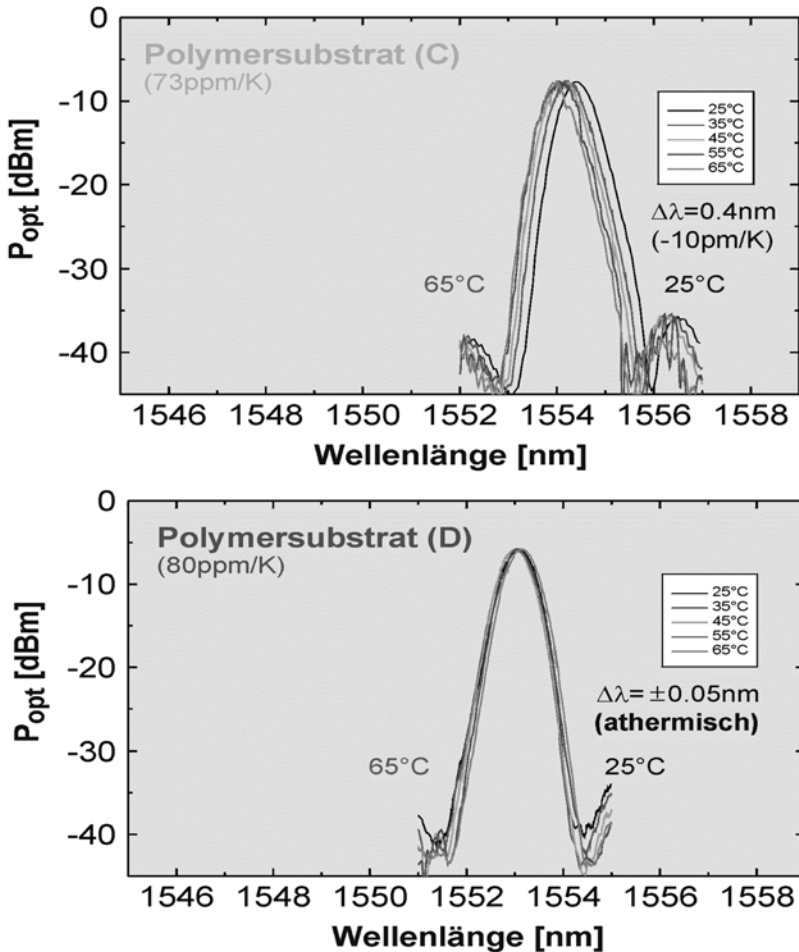


Abb. 4: Verschiebung der Filterkurven dreier verschiedener polymerbasierter AWGs in Abhängigkeit von der Temperatur

Durch Verwendung verschiedener Monomere können die Eigenschaften der Polycyanurate in einem weiten Bereich eingestellt werden. Verwendung von Monocyanaten als Coreaktanten führen zu einer Auflockerung des Netzwerkes und zu einer Absenkung der Glasübergangstemperatur T_g des resultierenden Polymers. Dies hat den Effekt, daß dämpfungserhöhende Nebenreaktionen unterdrückt werden. Auch kann der Fluorgehalt durch Verwendung

hochfluorierter aliphatischer Monocyanate erhöht werden. Dadurch wird die optische Dämpfung von über 1,0 dB/cm auf unter 0,3 dB/cm @1550 nm gesenkt.

6. Dank

Dank gilt Herrn Norbert Keil, Herrn Crispin Zawadzki und Herrn Prof. Huihai Yao für Design, Entwicklung und Herstellung der integrierten optischen Komponenten, Herrn Dr. Jörg Bauer, Herrn Dr. Christian Dreyer und Frau Karin Göcks für Entwicklung, Synthese und Charakterisierung der polymeren Wellenleiter- und Substratmaterialien.

Dank gilt auch den BMBF für die Finanzierung eines Teils der Arbeiten.

7. Literatur

1. M. Bauer; J. Schneider; C. Dreyer; J. Bauer; N. Keil; H. H. Yao; C. Zawadzki: *Temperature insensitive optical waveguide device, US-Patent angemeldet 2002*
2. M. Bauer; J. Schneider; C. Dreyer; N. Keil; H. H. Yao; C. Zawadzki: *Method for shifting the central wavelength of optical waveguide devices by irradiation, EP-Patent angemeldet 2002*
3. Yao, H. H.; Zawadzki, C.; Keil, N.; Bauer, M.; Dreyer, C.; Schneider, J.: Athermal all-polymer arrayed waveguide grating multiplexer. In: *OFC 2002, Anaheim, CA (USA), Conf. Dig.* (2002), S. 12–14
4. Keil, N.; Yao, H. H.; Zawadzki, C.; Dreyer, C.; Bauer, J.; Bauer, M.: Athermal all-polymer arrayed waveguide grating multiplexer. In: *Electron. Lett.* 37 (2001), Nr. 9, S. 575–576
5. M. Bauer; J. Bauer; C. Dreyer; N. Keil; C. Zawadzki, Offenlegungsschrift: *Optical waveguides derived from a combination of poly(perfluorocyclobutanes) and polymeric cyanates* EP 1067405.
6. M. Bauer; J. Bauer; C. Dreyer; N. Keil; C. Zawadzki, Offenlegungsschrift: *Optical waveguides derived from a combination of poly(perfluorocyclobutanes) and polymeric cyanates* WO 0102879.
7. M. Bauer; J. Bauer; C. Dreyer; N. Keil; C. Zawadzki, Offenlegungsschrift: *Optical waveguides derived from a combination of poly(perfluorocyclobutanes) and polymeric cyanates* WO 0102880.
8. M. Bauer; J. Bauer; C. Dreyer; N. Keil; C. Zawadzki, Offenlegungsschrift: *Poly-cyanate copolymers prepared from polyfunctional cyanates and fluorinated monocyanates* EP 1067149.
9. M. Bauer; J. Bauer; C. Dreyer; N. Keil; C. Zawadzki, Offenlegungsschrift: *Waveguide systems or structures or parts thereof, containing polycyanate copolymers*

- prepared from polyfunctional cyanates and fluorinated monocyanates* WO 0102464.
10. M. Bauer; J. Bauer; C. Dreyer; N. Keil; C. Zawadzki, Offenlegungsschrift: *Polycyanate copolymers prepared from polyfunctional cyanates and fluorinated monocyanates, and optical elements prepared therefrom* WO 0102465.
 11. M. Bauer; J. Bauer; C. Dreyer; N. Keil; C. Zawadzki, Offenlegungsschrift: *Thermosetting plastics as substrate materials for optical systems* EP 1067406.
 12. M. Bauer; J. Bauer; C. Dreyer; N. Keil; C. Zawadzki, Offenlegungsschrift: *Thermosetting plastics as substrate materials for optical systems* WO 0102878.