

## 6 Zusammenfassung

Die heute verfügbaren optoelektronischen Bauelemente wie beispielsweise Photodioden, Modulatoren oder optische Halbleiter-Verstärker sind hinsichtlich ihrer Funktionsweise hochentwickelt und durchlaufen einen ständigen Optimierungsprozess. Dank modernster Fertigungsmethoden ist die Herstellung dieser Bauelemente vielfach mit Methoden der Massenfertigung möglich. Ein Schlüsselproblem der optischen Nachrichtentechnik ist zur Zeit jedoch die effiziente Verbindung dieser optoelektronischen Bauelemente mit dem Übertragungsmedium Glasfaser. Trotz weltweiter Anstrengungen ist bis heute kein kostengünstiges und gleichzeitig effizientes Verfahren zur Realisierung dieser Verbindung verfügbar.

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung eines neuartigen Konzepts zur Faser-Chip-Kopplung, wobei der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Einkopplung der optischen Leistung von der Faser in ein Wellenleiter-Bauelement liegt. Bei dem verwendeten Wellenleiter-Bauelement handelt es sich um einen InGaAsP/InP-Elektroabsorptions(EA)-Modulator für eine Betriebswellenlänge von  $1,55 \mu\text{m}$ . Bei der Entwicklung der Faser-Chip-Kopplung steht die kostengünstige Realisierbarkeit des Konzepts unter Anwendung von Standardverfahren der Halbleitertechnologie im Vordergrund. Diese Forderung ist eine wichtige Voraussetzung für eine spätere Umsetzung des Konzepts mit Methoden der Massenfertigung. Neben dem in dieser Arbeit eingesetzten Bauelement soll das Konzept sowohl auf andere Wellenleiter-Bauelemente als auch auf andere Materialsysteme wie etwa Si oder GaAs übertragen werden können. Als weitere Zielsetzung soll ein Einkoppelverlust unter 3 dB erreicht werden sowie neben der aktiven Ausrichtung der Glasfaser auch deren passive Positionierung möglich sein. Wesentlich hierbei ist die Realisierung aller Ziele ohne eine Veränderung der optischen Eigenschaften des Bauelements vornehmen zu müssen.

Der theoretische Teil der Arbeit umfaßt im wesentlichen vier Themenbereiche: Zunächst werden die Grundlagen der Wellenausbreitung in indexgeführten optischen Wellenleitern behandelt und alle zum weiteren Verständnis

wesentlichen Begriffe eingeführt. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden die bei der Faser-Chip-Kopplung auftretenden optischen Verlust-Mechanismen behandelt. Auf der Basis dieser Betrachtung wird anschließend eine Einteilung der zur Realisierung einer effizienten Faser-Chip-Kopplung notwendigen Maßnahmen durchgeführt. Ungeachtet des Ergebnisses der Verlust-Betrachtung im zweiten Teil des theoretischen Kapitels besteht bei der Faser-Chip-Kopplung ein Hauptproblem in der Anpassung der Modenfelder von optischer Faser und Wellenleiter-Bauelement. Da keine Veränderung der optischen Eigenschaften des Bauelementes erfolgen soll, wird im dritten Teil des theoretischen Kapitels die Transformation des Modenfeldes optischer Fasern betrachtet. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem Entwurf von Fasergeometrien, die eine verlustarme Transformation des Modenfeldes erlauben. Hierzu werden zwei unterschiedliche, mittels numerischer Simulation bestimmte Profilverläufe vorgestellt. Die als Ergebnis dieser Untersuchung entstehenden optischen Komponenten werden im Weiteren als faseroptische Modenfeld-Transformatoren (FMT) bezeichnet. Zum Abschluss dieses Kapitels wird untersucht, unter welchen Randbedingungen die Modenfeld-Transformation auch unter Verwendung von Faserlinsen realisiert werden kann.

Das dritte Kapitel dieser Arbeit behandelt die technologische Realisierung aller für die Faser-Chip-Kopplung benötigten Komponenten. Hierzu wird zunächst die Herstellung verlustarmer faseroptischer Modenfeld-Transformatoren mittels nasschemischem Ätzen sowie thermischem Ziehprozess erläutert. Hieran schließt sich im zweiten Teil dieses Kapitels die Beschreibung der Herstellung von Faserlinsen an. Im dritten Teil dieses Kapitels wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Integrationskonzept zur aktiven und passiven Positionierung der optischen Faser sowie zur mechanisch langzeitstabilen Verbindung mit dem Wellenleiter-EA-Modulator vorgestellt und dessen technologische Realisierung erläutert. Hierzu erfolgt zunächst eine ausführliche Untersuchung der zur Herstellung der Bauelemente verwendeten Schichtstruktur mit Hilfe eines STEM sowie mittels Röntgenbeugung. Aufgrund der erforderlichen hohen Qualität der optischen Stirnflächen der Wellenleiter-Modulatoren zur Minimierung der bei der Lichtein- und Auskopplung entstehenden optischen Verluste und der gleichzeitigen Forderung nach dem ausschließlichen Einsatz

von Standard-Verfahren der Halbleiter-Technologie werden im weiteren Verlauf des dritten Teils dieses Kapitels nasschemische Ätzlösungen behandelt, mit denen beide Anforderungen erfüllt werden können. Nach der Diskussion dieser Ätzlösungen erfolgt abschließend die Erläuterung aller zur Realisierung des Integrationskonzepts wesentlichen Prozessschritte. Hierbei wird gezeigt, dass die Zielsetzung hinsichtlich der Realisierung des Integrationskonzepts mit Standard-Verfahren der Halbleiter-Technologie erreicht werden kann. Darüber hinaus kann das entwickelte Konzept sowohl auf andere Bauelemente als auch auf andere Materialsysteme übertragen werden. Durch vergleichende Messungen an Modulatoren mit Bruchspiegeln konnte weiterhin gezeigt werden, dass die angestrebte hohe Qualität der Modulator-Stirnflächen durch die entwickelten Ätzlösungen erreicht werden konnte. Zum Abschluss dieses Kapitels wird ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Verfahren zur Dosierung geringster Klebstoffmengen vorgestellt, mit dem eine kostengünstige und mechanisch langzeitstabile Fixierung der optischen Fasern realisiert werden kann.

Zur optischen Charakterisierung der entwickelten faseroptischen Modenfeld-Transformatoren und der Faserlinsen sowie zur messtechnischen Bestimmung der bei der Faser-Chip-Kopplung auftretenden Verluste werden in Kapitel 4 zwei Messplätze beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und aufgebaut wurden.

Wie experimentelle Untersuchungen der entwickelten faseroptischen Modenfeldtransformatoren zeigen, kann mittels nasschemischen Ätzens eine Transformation des Modenfelddurchmessers von  $10,5\ \mu\text{m}$  (Modenfelddurchmesser der Standard-Einmodenfaser) auf  $0,8\ \mu\text{m}$  bei einem mittleren Transformations-Verlust von  $0,13\ \text{dB}$  erreicht werden.

Analoge Untersuchungen der mittels thermischem Ziehprozess hergestellten faseroptischen Modenfeld-Transformatoren zeigen neben einer Reduzierung des Modenfelddurchmessers von  $10,5\ \mu\text{m}$  auf  $2,2\ \mu\text{m}$  auch die Möglichkeit zur Verbreiterung des Modenfelddurchmessers. Demonstriert wurde hierbei eine Verbreiterung des Modenfelddurchmessers auf  $17,6\ \mu\text{m}$ . Der mittlere Trans-

formations-Verlust der hergestellten faseroptischen Modenfeld-Transformatoren betrug 0,24 dB.

Mit den hergestellten Faserlinsen konnte eine Reduzierung des Modenfelddurchmessers von 10,5  $\mu\text{m}$  auf 4,4  $\mu\text{m}$  bei einem mittleren Transformations-Verlust von 0,53 dB erreicht werden. Durch die Kopplung eines nasschemisch geätzten faseroptischen Modenfeld-Transformators mit einem Modenfelddurchmesser von 1,5  $\mu\text{m}$  mit einem 211 mm langen und 12  $\mu\text{m}$  breiten EA-Modulator konnte der Einkoppelverlust von 6,9 dB bei Einkopplung mit einer Standard-Einmodenfaser auf 1 dB reduziert werden. Damit konnte die eingangs gemachte Zielsetzung, einen Einkoppelverlust unter 3 dB zu realisieren nicht nur erreicht werden, sondern wurde noch deutlich übertroffen.

Bei der Kopplung einer Faserlinse mit einem Durchmesser von 29  $\mu\text{m}$  mit dem EA-Modulator wurde ein Einkoppelverlust von 3,6 dB bestimmt.

Weiterhin wurden Untersuchungen zur Toleranz hinsichtlich einer Fehl-Positionierung des faseroptischen Modenfeld-Transformators durchgeführt. Die höchste Toleranz besteht gemäß dieser Untersuchungen hinsichtlich einer möglichen lateralen Fehl-Positionierung. Hierbei kann selbst bei einem Versatz von 12,5  $\mu\text{m}$  noch der angestrebte Einkoppelverlust von weniger als 3 dB erreicht werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass bei einem Abstand von maximal 1  $\mu\text{m}$  zwischen dem faseroptischen Modenfeld-Transformator und dem Bauelement noch der angestrebte Einkoppelverlust erreicht werden kann. Die geringste Toleranz besteht hinsichtlich einer möglichen vertikalen Positionierung der faseroptischen Modenfeld-Transformatoren. Hier wird bei einer Fehl-Positionierung von 400 nm nach unten beziehungsweise 340 nm nach oben der Einkoppelverlust von 3 dB überschritten.

Unter Anwendung der Fabry-Perot-Messtechnik wurde ein Propagationsverlust von 6,9 dB für den verwendeten EA-Modulator ermittelt.

Zusätzlich zu den Untersuchung zur Einkopplung wurden noch erste Untersuchungen zur Auskopplung der optischen Leistung aus dem EA-Modulator durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass der Aukoppelverlust bei Verwendung zweier identischer faseroptischer Modenfeld-Transformatoren mit einem Modenfelddurchmesser von 3  $\mu\text{m}$  um etwa 0,7 dB über dem entsprechenden Einkoppelverlust liegt. Demonstriert werden konnte ein

Auskoppelverlust von 3,6 dB bei Verwendung eines faseroptischen Modenfeld-Transformators mit einem Modenfelddurchmesser von 3  $\mu\text{m}$ . Wie anhand einer Abschätzung gezeigt wird, kann mit den entwickelten faseroptischen Modenfeld-Transformatoren ein Auskoppelverlust von etwa 1,7 dB erreicht werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich insbesondere die nasschemisch geätzten faseroptischen Modenfeld-Transformatoren für eine verlustarme und gleichzeitig kostengünstige Faser-Chip-Kopplung eignen. Die an die Faser-Chip-Kopplung gestellten Zielsetzungen konnten nicht nur in allen Punkten erreicht werden sondern wurden teilweise noch deutlich übertroffen. Darüber hinaus wurden neben den gesetzten Zielen noch erste Ergebnisse zur Auskopplung optischer Leistung aus dem Wellenleiter-Bauelement zurück in eine optische Faser vorgestellt.