

Strahlformung in der Femtosekundenlaser-Mikrostrukturierung

Auszüge aus einer Dissertation.
Texte gekürzt und Zitate entfernt

Leibniz Universität Hannover

Matthias Pospiech

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Nichtlineare Wechselwirkungen von Femtosekunden-Laserpulsen mit dielektrischen Medien	3
2.1.1	Nichtlineare Anregungsprozesse	3
2.2	Laserinduzierte Änderungen des Brechungsindex in Quarzglas	4
2.2.1	Materialeigenschaften von Quarzglas	4
2.2.2	Prozesse der Materialveränderungen	4
2.3	Wellenleiter	4
2.3.1	Evaneszente Kopplung zwischen Wellenleitern	4
3	Erzeugung von Wellenleiterstrukturen in Quarzglas	7
3.1	Experimenteller Aufbau	7
3.1.1	Lasersystem	7

Kapitel 1

Einleitung

Motivation

...

Gliederung

Zunächst werden in Kapitel **2** die Grundlagen der nichtlinearen Wechselwirkung von ultrakurzen Laserpulsen und die nachfolgenden Prozesse der Energieverteilung erläutert. Für Quarzglas werden die resultierenden Materialveränderungen und die daraus folgende Erzeugung von Wellenleiterstrukturen dargestellt. Zudem werden die Grundlagen der Strahlformung, insbesondere die Skalare Beugungstheorie und weitere Näherungen zur Berechnung der Strahlformung im Fokus eines hart fokussierenden Mikroskopobjektivs vorgestellt.

In Kapitel **3** werden der experimentelle Aufbau zur Lasermaterialbearbeitung und die Methoden zur Analyse der erstellten Wellenleiter dargestellt. Im Anschluss werden die Eigenschaften der Strukturen im Hinblick auf die bestmöglichen Parameter zur Erzeugung von Wellenleitern analysiert.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die Experimente der folgenden Kapitel beschrieben. Zunächst wird, ausgehend von den nichtlinearen Wechselwirkungen von Femtosekunden-Laserpulsen mit dielektrischen Medien, die Herstellung von Wellenleitern in Glas eingeführt. Anschließend werden die Grundlagen der Strahlformung, insbesondere die skalare Beugungstheorie und die Fourieroptik behandelt. Für die Strahlformung mit hoher numerischer Apertur werden abschließend Rechenmodelle vorgestellt, mit denen sich die Lichtverteilung in der Fokusebene zuverlässig berechnen lässt.

2.1 Nichtlineare Wechselwirkungen von Femtosekunden-Laserpulsen mit dielektrischen Medien

In dieser Arbeit wird die Interaktion von Femtosekunden-Laserpulsen mit transparenten Gläsern (Kapitel **3**) untersucht. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse, im speziellen die nichtlineare Ionisation und die Avalanche-Ionisation in Abschnitt **2.1.1**. Anschließend werden die zeitlich nachfolgenden Effekte der Relaxation in dielektrischen Medien dargestellt. Die Verteilung der Energie führt in Gläsern zu einer lokalisierten Dichte- und Brechungsindexänderung, die in Abschnitt **2.2.2** diskutiert wird. Diese Prozesse finden Anwendung bei der Erzeugung von Wellenleiterstrukturen, weiter dargestellt in Kapitel **3**.

2.1.1 Nichtlineare Anregungsprozesse

Wird ein Laserpuls in ein Material mit einer Bandlücke E_G größer als die Photonenenergie eingestrahlt, so findet keine lineare Absorption durch direkte Übergänge von dem Valenz- in das Leitungsband statt; das Material ist transparent für das Laserlicht. Durch den Einsatz gepulster Laser kommt es zu hohen Spitzenintensitäten und damit zu nichtlinearen Wechselwirkungen, durch welche die Elektronen die Bandlücke überwinden können. Damit diese nichtlinearen Prozesse stattfinden, muss die Stärke des vom Laser erzeugten elektrischen Feldes in der Nähe der Feldstärke liegen, die ein Valenzelektron an das Atom bindet. . . .

Die nichtlineare Ionisation kann durch *Photoionisation* und *Avalanche-Ionisation* erreicht werden. Photoionisation bezieht sich auf die direkte Anregung von Elektronen durch das Laserfeld und kann in zwei unterschiedliche Arten unterteilt werden, zum einen die Multiphotonen-Ionisation (MPI) und zum anderen die Tunnel-Ionisation. Diese sind abhängig von den Laserparametern, insbesondere der Intensität und der Wellenlänge.

2.2 Laserinduzierte Änderungen des Brechungsindex in Quarzglas

Die in Abschnitt **2.1.1** vorgestellten nichtlinearen Prozesse der Materialveränderung durch hochintensive Laserpulse führen in Gläsern im Fokusbereich zu einer Änderung der Dichteverteilung und damit zu einer Änderung des Brechungsindex im Material. In dieser Arbeit wird ausschließlich Quarzglas bearbeitet, bei dem dieser Effekt 1996 zuerst nachgewiesen wurde. Im Folgenden werden zuerst die Materialeigenschaften von Quarzglas betrachtet und nachfolgend die zugrundeliegenden Prozesse der Materialveränderungen eingeführt (Abschnitt **2.2.2**).

2.2.1 Materialeigenschaften von Quarzglas

Gläser zeichnen sich allgemein durch ihre amorphe Kristallstruktur aus, bei der die Moleküle ohne eine Fernordnung vernetzt sind. Des Weiteren werden bei Gläsern, im Gegensatz zu kristallinen Systemen, die mikroskopische Struktur und damit makroskopische Eigenschaften wie Dichte und Brechungsindex von der Abkühlungsgeschwindigkeit aus der Schmelze beeinflusst.

...

2.2.2 Prozesse der Materialveränderungen

In Quarzglas folgen der Aufheizung und Freisetzung von Ladungsträgern verschiedene physikalische Prozesse, die sich in zwei wesentliche Bereiche aufteilen lassen. Für niedrigere Pulsenergien ändert sich das Glas in Form einer permanenten Dichte- und Brechungsindexänderung. Für den Fall hoher Pulsenergien treten im Glas Schockwellen auf, die in Blasenstrukturen mit Hohlräumen resultieren und damit im Sinne der Erzeugung von gezielten Brechungsindexänderungen einer Materialzerstörung entsprechen. Die Modelle zur Erklärung dieser beiden Arten der Materialveränderung werden im Folgenden vorgestellt.

...

2.3 Wellenleiter

Die zuvor vorgestellten laserinduzierten Änderungen des Brechungsindex von Gläsern lassen sich zur Erzeugung von lichtleitenden Strukturen einsetzen. Die Grundlagen der Lichtleitung und die Eigenschaften dieser Strukturen in Abhängigkeit der Laserparameter werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

2.3.1 Evaneszente Kopplung zwischen Wellenleitern

Befinden sich zwei Wellenleiter in einem geringen Abstand, sodass die evaneszenten Felder der Wellenleitermode überlappen, so wird Licht periodisch von einem in den anderen Wellenleiter übergekoppelt. Der formelle Ansatz zur Berechnung der Ausbreitung von Licht in diesen Strukturen besteht darin, die Entwicklung der Wellenleitermoden des gesamten Systems in Abhängigkeit der Propagationslänge mit den Maxwell-Gleichungen

zu lösen. Diese Moden unterscheiden sich von den Moden der einzelnen Wellenleiter. Eine exakte Analyse mit diesem Modell ist allerdings sehr aufwendig. Für die Beschreibung der Leistungsverteilung ist es hinreichend den Prozess durch die Theorie gekoppelter Moden (*coupled mode theory*) zu beschreiben. Diese Theorie geht von einer schwachen Kopplung der Moden von beiden Lichtwellenleitern aus. Die Näherung besteht in diesem Fall darin, das elektrische Feld als Linearkombination der isolierten Wellenleitermoden auszudrücken. Der Leistungstransfer zwischen den Wellenleitern findet durch den Überlapp der exponentiell abklingenden Mode des lichtleitenden Wellenleiters und der Mode des zweiten Wellenleiters statt. Gleichung (2.1) beschreibt das elektrische Feld für zwei parallele Wellenleiter, wobei die Amplituden $A_{1,2}(z)$ mit der Propagationslänge z variieren:

$$E = A_1(z)E_1(x, y)e^{-i\beta_1 z} + A_2(z)E_2(x, y)e^{-i\beta_2 z}. \quad (2.1)$$

E_1 und E_2 sind die normierten Moden in den Wellenleitern. Die Propagationskonstante $\beta_i = k_0 n_i$ (mit $k_0 = \omega_0/c$) beschreibt die Materialeigenschaften anhand des Brechungsindexes.

...

Kapitel 3

Erzeugung von Wellenleiterstrukturen in Quarzglas

Gepulste Lasersysteme mit Femtosekunden-Pulslängen und hohen Pulswiederholraten bieten vielfältige Möglichkeiten zur Materialveränderung von transparenten Gläsern, insbesondere auf Basis der nichtlinearen Absorption (Abschnitt **2.1.1**). In dieser Arbeit werden ultrakurze Laserpulse zur Materialveränderung von Quarzglas eingesetzt. Durch gezielte Wahl der Laserparameter lässt sich dabei eine Brechungsindexveränderung im Fokusbereich erreichen, die den optischen Eigenschaften eines Lichtwellenleiters entspricht.

In diesem Kapitel werden der experimentelle Aufbau zur Lasermaterialbearbeitung und die Analyse der erstellten Wellenleiter vorgestellt. Im Anschluss werden die Eigenschaften der Strukturen im Hinblick auf die bestmöglichen Parameter analysiert. Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel zur Erzeugung von komplexeren photonischen Strukturen verwendet.

...

3.1 Experimenteller Aufbau

Die Eigenschaften des verwendeten Femtosekunden-Lasersystems, die experimentelle Umsetzung der Materialbearbeitung und der Aufbau zur Analyse der Wellenleiter werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

3.1.1 Lasersystem

Die Parameter des Lasersystems sind von entscheidender Bedeutung für die Materialbearbeitung, wie anhand der Einführung in die nichtlineare Absorption **2.1.1** ersichtlich ist.

Das in dieser Arbeit verwendete Lasersystem zur Bearbeitung von Quarzglas wurde in der Arbeitsgruppe entwickelt und aufgebaut. ...