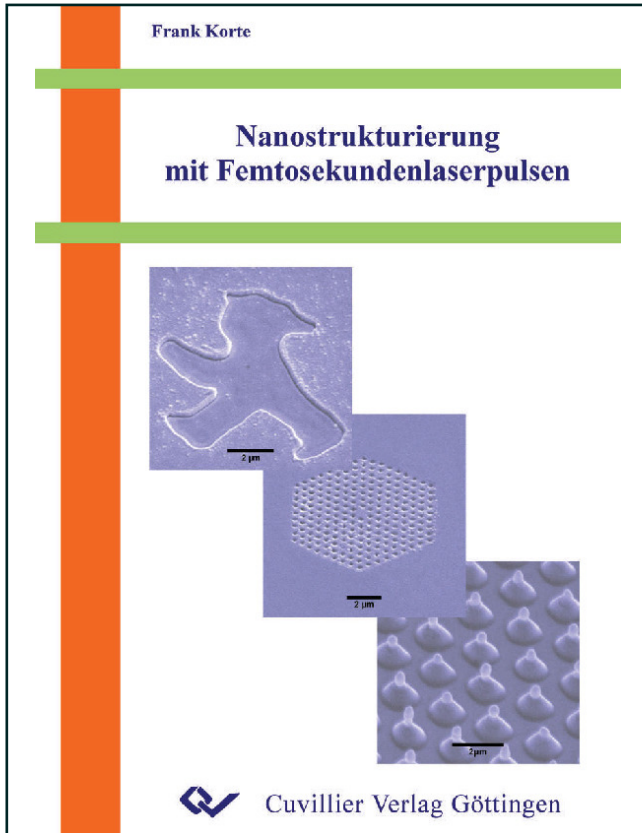




Frank Korte (Autor)

Nanostrukturierung mit Femtosekundenlaserpulsen



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/3150>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1. Einleitung

Internationale Studien wie „Harnessing Light - Optical Science and Engineering for the 21st Century“ und nationale Studien wie die „Deutsche Agenda - Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“ haben eindrucksvoll demonstriert, dass die Integration von optischen und elektronischen Bauelementen mit ihrem rapiden Fortschritt in den letzten Jahren der Innovationsmotor des 21. Jahrhunderts sein wird. Zur Umsetzung dieser Zukunftstechnologie wird die Modifikation von Werkstoffen in der Größenordnung optischer Wellenlängen erforderlich. Derzeit werden Nanostrukturen im Bereich von 100 nm überwiegend durch Photolithographie bzw. Ionenstrahlolithographie hergestellt. Die Lithographie ist aber aufgrund ihrer zahlreichen Prozessstufen, wie z.B. Beschichten, Belichten, Ätzen und Passivieren, sehr aufwendig und benötigt daher breitgefächerte, kostenintensive Betriebsmittel.

Neben der Lithographie wird eine neue, einfache, schnelle und präzise, aber trotzdem variable Nanostrukturierungstechnologie zur Prototypenherstellung benötigt. Ein potentielles Instrument ist hier der Laser, der schon kurz nach seiner Erfindung in vielen Bereichen der Industrie und Medizin als geeignetes und effizientes Werkzeug erfolgreich zur Strukturierung eingesetzt wurde. Er fand jedoch lange Zeit keinen Zugang in die präzise Mikromaterialbearbeitung, da thermische und mechanische Schädigungen nicht vermieden werden konnten. Der Durchbruch gelang in den letzten Jahren mit dem Ultrakurzpulslaser mit Pulsdauern kleiner als zehn Pikosekunden. Aufgrund der kurzen Laser-Materie-Wechselwirkungszeit eignet er sich, um höchste Präzision sowie schädigungsfreie und reproduzierbare Bearbeitung zu gewährleisten. Sekundäreffekte wie z.B. Aufschmelzung, Grat- und Rissbildung sind unterdrückt. Dieses System erlaubt für nahezu alle Festkörper einen universellen Einsatz. Dagegen wäre das Potenzial des Ultrakurzpulslasers für die hochpräzise Nanostrukturierung zu Beginn dieser Arbeit noch weitgehend unbekannt.

Die Vorteile dieser Lasersysteme insbesondere des Femtosekundenlasers ($\tau < 150$ fs) werden in der vorliegenden Arbeit genutzt, um erstmals die Grundlagen der Laser-Materie-Wechselwirkung auf der Nanometerskala zu studieren.

Aufgrund der minimalen thermischen Einwirkung der Laserpulse ist es erstmals möglich, den Einfluss physikalischer Konstanten wie z.B. die Bandlücke eines Kristalls aber auch die Wirkung thermo-physikalischer Parameter wie z.B. die Elektron-Phonon-Kopplung auf das Abtragsergebnis hin zu untersuchen. Weiter können thermische sowie mechanische Akkumulationseffekte ohne störende Nebeneffekte in direkter Beziehung zum einwirkenden Laserpuls betrachtet werden.

Auf der Basis eines Zwei-Temperatur-Modells, welches den extremen Nichtgleichgewichtszustand zwischen den Elektronen und dem Ionensystem beschreibt, erfolgt eine Erweiterung des Modells für dünne (bis einige 100 nm) Metallschichten. Anhand des erweiterten Zwei-Temperatur-Modells werden grundlegende experimentelle Untersuchungen verifiziert.

Die für Femtosekundenlaserpulse typische, exakt definierte Abtragsschwelle ermöglicht es, Strukturen unterhalb des Beugungslimits der verwendeten Laserstrahlung zu erzeugen. Hieraus ergeben sich zwei wichtige Ziele, die im Rahmen dieser Arbeit verfolgt werden: Wie zuverlässig kann die Nanostrukturierung mit Femtosekundenlaserpulsen realisiert werden? Wo befinden sich die physikalischen und technischen Grenzen der Nanostrukturierung mit Femtosekundenlaserpulsen?

Die Arbeit gliedert sich wie folgt:

Zunächst werden im folgenden Kapitel die Grundlagen für die Materialbearbeitung mit Femtosekundenlaserpulsen veranschaulicht und theoretisch beschrieben. Im Anschluss folgt eine für dünne Metallschichten erweiterte, numerische Beschreibung des Zwei-Temperatur-Modells. Weiterhin wird eine Diskussion über die Modifikations- und Abtragsschwelle sowie über das Auflösungsvermögen und die minimale Strukturgröße geführt.

Im dritten Kapitel werden die experimentellen Grundlagen vorgestellt. Die Erzeugung und Verstärkung von Femtosekundenlaserpulsen werden anhand der verwendeten Lasersysteme beschrieben. Die für die Nanostrukturierung extrem wichtige Laserpulscharakterisierung und Laserpulsformung sind ebenfalls in diesem Kapitel zusammengestellt.

Kapitel 4 befasst sich mit den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Nanostrukturierung an dünnen Metallschichten und transparenten Materialien. Thermische Akkumulationseffekte werden anhand des erweiterten Zwei-Temperatur-Modells diskutiert. Das Schmelzen von Material im Nanovolumen wird dargestellt und ein anschauliches Modell für die Dynamik der Schmelze gegeben.

Im fünften Kapitel werden schließlich mögliche Anwendungen für die Nanostrukturierung mit Femtosekundenlaserpulsen aus den unterschiedlichen Bereichen, wie Lithographie, Metrologie, Optik und Photonik, vorgestellt.