Diodenlaserbasierte THz-Systeme und Anwendungen

Kurzfassung

Lisa C. Kreuzer

Die Terahertz-Technologie (THz) bietet vielseitige Möglichkeiten für die zerstörungsfreie Materialcharakterisierung und biologische Diagnostik, was sie zu einem vielversprechenden Werkzeug in verschiedenen Bereichen macht. Trotz intensiver Forschung existieren bislang jedoch nur wenige etablierte und breit genutzte Anwendungen. Die bisherigen industriellen Umsetzungen verfügen zwar über ein großes Potenzial, sind jedoch aufgrund technischer Herausforderungen begrenzt. Wesentliche Einschränkungen entstehen dabei durch mechanisch bewegte Komponenten wie Verzögerungsstrecken, die langsam und störanfällig sind, sowie durch den Bedarf an stabilen gepulsten Lasersystemen mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich.

Im ersten Teil dieser Dissertation stand die detaillierte Charakterisierung sehr kompakter Diodenlaser im Fokus, mit dem Ziel, deren Eignung für den Einsatz in THz-Systemen, insbesondere im Kontext der asynchronen optischen Abtastung (ASOPS), zu bewerten.Ein entscheidender Aspekt der ASOPS-Technik ist der Verzicht auf mechanische Verzögerungsstrecken, was kompakte, robuste und schnelle Messsysteme ermöglicht. Halbleiterlaser versprechen durch ihre kompakte Bauweise und Integrationsfähigkeit Vorteile gegenüber etablierten Festkörperlasern, die zwar ultrakurze Pulse erzeugen, jedoch in Größe und Komplexität limitiert sind. Zur Untersuchung wurden verschiedene Laserdesigns analysiert, insbesondere hinsichtlich unterschiedlicher Absorberlängen sowie Rippen- und Trapez-Strukturen. Die Ergebnisse bieten wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Optimierungen der Laserdesigns im Hinblick auf ihre Eignung für kompakte, gepulste THz-Systeme. Da sich die in dieser Arbeit untersuchten Diodenlaser aufgrund ihrer vergleichsweise langen Pulsdauern als (noch) nicht ausreichend geeignet für die zeitaufgelöste THz-Spektroskopie erwiesen, wurde im zweiten Teil der Arbeit ein alternativer Ansatz auf Basis kontinuierlicher Wellenanregung (CW-THz) verfolgt. Diese Methode wurde zur zerstörungsfreien Detektion von Schwermetallen in Pflanzenblättern angewandt. Am Beispiel der hyperakkumulierenden Pflanze Arabidopsis halleri wurde ein Proof-of-Principle erbracht, der zeigt, dass sich mit der CW-THz-Spektroskopie spektrale Unterschiede zwischen Proben aus kontaminierten und nicht kontaminierten Böden zuverlässig identifizieren lassen. Ergänzende Analysen mittels optischer Kohärenztomographie (OCT) zur Blattdickenbestimmung sowie induktiv gekoppelter Plasma-optischer Emissionsspektroskopie (ICP-OES) zur quantitativen Bestimmung der Schwermetallkonzentration validierten diese Ergebnisse. Um die mechanische Verzögerungsstrecke in dem CW-THz-Systemzu zu ersetzen, wurden im dritten Teil der Arbeit wellenlängenabhängige Phasenverschiebungs-Spiegel (WDPDM) untersucht. Dieses Konzept nutzt speziell entwickelte optische Spiegelbeschichtungen, die definierte, wellenlängenabhängige Phasenverschiebungen erzeugen. Experimente zeigten eine hohe Stabilität und Reproduzierbarkeit des Systems, und anhand der Schichtdickenmessung von 3D gedruckten Proben wurde erfolgreich ein Proof-of-Concept erbracht.

Die vorliegende Arbeit zeigt anhand dreier aufeinander aufbauender Ansätze exemplarisch, wie zentrale Herausforderungen der THz-Spektroskopie adressiert werden können, von der Charakterisierung kompakter Lasersysteme über den Nachweis biologisch relevanter Unterschiede bis hin zu neuartigen Komponenten. Damit leistet sie einen Beitrag zur Etablierung robuster, integrierbarer und industrietauglicher THz-Systeme.