

# **Optische Hochfrequenztechnik und Photonik**

Herausgeber: B. Schmauß

Milad Yahyapour

## **A Fast, Flexible, and Compact Terahertz Time-Domain System**

Ein schnelles, flexibles und kompaktes  
Terahertz-Zeitbereichssystem



FRIEDRICH-ALEXANDER  
UNIVERSITÄT  
ERLANGEN-NÜRNBERG



# **A Fast, Flexible, and Compact Terahertz Time-Domain System**

**Ein schnelles, flexibles und  
kompaktes  
Terahertz-Zeitbereichssystem**

Der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zur  
Erlangung des Doktorgrades

**Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)**

vorgelegt von

**Milad Yahyapour**

aus Mianeh

Als Dissertation genehmigt von  
der Technischen Fakultät der  
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.2020

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß

Prof. Dr. rer. nat. Sascha Preu

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

**Milad Yahyapour**

**A Fast, Flexible, and Compact Terahertz  
Time-Domain System**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Düren 2020

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7534-2

ISSN 1866-6043

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*In memory of my mother*



---

## Abstract

The term “terahertz radiation” denotes electromagnetic radiation in the frequency range between microwaves and infrared light. For a long time, it was not possible to generate intense, directional terahertz radiation, nor was this type of radiation easily detected. This left a gap in the electromagnetic spectrum, known as the “terahertz gap.” In the last 30 years, technical progress paved the way towards the development of today’s terahertz systems. For instance, the invention of ultrashort pulse lasers and the advent of fast photoconductive materials played an important role in the development of terahertz time-domain (TD) systems. These systems, which generate and detect terahertz pulse traces, have recently gained increasing attention for both scientific and industrial applications (e.g., spectroscopy and the non-destructive testing of materials).

Terahertz TD systems generally rely on a so-called “pump and probe” technique: at the receiver, the incident terahertz pulse is sampled with a time-shifted laser pulse. This concept necessitates a delay line, which usually presents the bottleneck in terms of measurement rate. Conventional terahertz TD systems generally employ a mechanical delay, which—if carefully designed—enables broadband measurements of up to several 100 terahertz pulse traces per second. This is still insufficient for some applications (e.g., thickness measurement in industrial applications that require measurement rates well above 1000 traces/s).

This thesis describes the development of a fast, flexible, and compact terahertz TD system based on electronically controlled optical sampling (ECOPS). The ECOPS technique features two ultrashort pulse lasers, where one laser illuminates the terahertz emitter and the other one illuminates the detector. The first one (i.e., pump laser) has a fixed cavity length and the second one (i.e., probe laser) has a variable cavity length. The probe laser includes a piezo actuator inside the cavity, which enables a fast variation of the cavity length and thereby a rapid optical sampling of the terahertz pulse. In other words, it helps to achieve high measurement rates. For industrial applications, however, other criteria are equally relevant: large scan ranges (at high measurement rates), the flexible adjustment of the measurement rate and scan range, and a small system footprint. Fulfilling all of the aforementioned requirements at once proves to be technologically challenging. For instance, achieving high scan ranges comes at a cost of employing bulkier components, and in contrast, the use of compact

components results in limited scan ranges. In this thesis, a feed-forward control of the piezo actuator is introduced, which removes the dependency between component size and scan range. This concept enables high scan ranges at high measurement rates while keeping the system footprint compact. The ECOPS that was built in the frame of this thesis system achieves scan ranges of approximately 750 ps, 340 ps, and 230 ps at measurement rates of 200 traces/s, 1000 traces/s, and 1600 traces/s, respectively. The fastest measurement rate demonstrated with the system amounts to 10,000 traces/s with 40 ps scan range.

Almost in every terahertz TD system, the time axis of the read-out pulses is—to some extent—nonlinear and distorted. In the case of the ECOPS system, nonlinearities occur due to the nonlinear displacement (i.e., mechanical hysteresis) of the piezo actuator. Therefore, the linearization of the time axis requires a precise knowledge of the piezo actuator position. Moreover, upcoming industrial applications (e.g. thickness measurements of polymer pipes in an extrusion line) require a real-time linearization of the time axis of the terahertz pulse traces. The linearization is ever more challenging in systems with high measurement rates, since the time interval between two consecutive terahertz pulses amounts to less than a millisecond. This thesis discusses a solution that controls the piezo displacement and thereby eliminates the need for reading out the piezo position. In a proof-of-principle experiment, a sample moves at typical industrial production-line speeds (1.15 m/s) and the ECOPS system resolves the sample thickness “inline.”

This thesis further compares the ECOPS system with a state-of-the-art conventional terahertz TD system—based on a precise mechanical delay—in terms of dynamic range (DR) and signal-to-noise ratio (SNR). Using similar scan ranges for both systems, the two systems achieve comparable DR and SNR values on the same time scale. Moreover, the timing jitter parameter is quantified for the ECOPS system.

Three selected applications demonstrate the suitability of the ECOPS system for different scientific and industrial scenarios, including thickness measurements, material spectroscopy, and magnetospectroscopy. For thickness measurements, the precision of the ECOPS experiment is compared to results obtained with a conventional terahertz TD system and a mechanical micrometer gauge. Within the measurement accuracy, the ECOPS results agree well with the results from the other two devices. For material spectroscopy, a sample with well-known optical parameters (a piece of polypropylene) is investigated with the ECOPS system. The results (refractive index and absorption coefficient) are compared with that of a conventional terahertz TD system. Again,

the results of both techniques agree within the measurement accuracy. In order to demonstrate a proof-of-principle magnetospectroscopy experiment, a pulsed magnet is combined with the ECOPS system. The table-top pulsed magnet operates at room temperature and generates a peak field strength of approximately 3 T. A graphite nanoplatelet layer with a thickness of less than 100 nm is investigated. The fast measurement rate of 5000 terahertz pulse traces per second permits an acquisition of 13 terahertz waveforms during the full width at half maximum (FWHM) magnetic-field pulse of 2.3 ms.



## Zusammenfassung

Terahertzstrahlung umfasst elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich zwischen Mikrowellen und Infrarot-Licht. Lange Zeit galten die Erzeugung und die Detektion der Terahertzstrahlung technisch als sehr schwierig. Dieser Fakt hinterließ in Bezug auf die technische Nutzung eine Lücke im elektromagnetischen Spektrum. In den letzten 30 Jahren haben diverse technische Fortschritte die Terahertztechnologie näher zur Marktreife gebracht. Beispielsweise ermöglichte die Erfundung der Ultrakurzpuls laser und der photoleitenden Terahertzantennen die Entwicklung von Terahertz-Zeitbereichssystemen. Diese Systeme erzeugen und detektieren Terahertzpulse und erfreuen sich in der letzten Zeit zunehmender Aufmerksamkeit in der Industrie und Forschung. Typische Anwendungen sind die Spektroskopie und die zerstörungsfreie Prüfung von Materialen.

Terahertz-Zeitbereich-Systeme basieren auf der sogenannten Anregung-und-Abfrage Technik (Englisch: pump and probe technique). Hierbei wird auf der Empfängerseite der ankommende Terahertzpuls mit einem zeitverzögerten Puls abgetastet. Dieses Konzept benötigt eine einstellbare Verzögerungseinheit. In der Vergangenheit wurden dafür mechanische Verzögerungsstrecken verwendet, die allerdings für schnelle Messungen nicht geeignet sind. Im besten Fall kann damit eine Messrate von einiger 100 Pulsspuren pro Sekunde erreicht werden. Für einige Applikationen ist das zu wenig; so wird beispielsweise für die industrielle Schichtdickenmessung eine Messrate von über 1000 Pulsspuren pro Sekunde benötigt.

In dieser Dissertation wird ein schnelles, flexibles und kompaktes Terahertz-Zeitbereichssystem auf Basis eines Verfahrens mit dem Namen "Elektronisch gesteuerte optische Abtastung" (englisch "Electronically Controlled Optical Sampling", ECOPS) entwickelt. Dieses Konzept benötigt zwei Ultrakurzpuls-Faserlaser, wobei ein Laser den Terahertz-Emitter und einer den Receiver beleuchtet. Dabei hat der erste Laser (Anregungslaser) eine feste Resonatorlänge und der zweite (Abfragelaser) hat eine variable Resonatorlänge. Der Abfragelaser beinhaltet einen Piezoaktor in der Kavität, sodass sich schnelle Änderungen der Resonatorlänge und damit ein schnelles optisches Abtasten des Terahertz-Pulses, d.h. hohe Messgeschwindigkeiten, realisieren lassen. Über das schnelle Messen hinaus sind für industrielle Anwendungen jedoch noch weitere Aspekte wichtig: flexibel einstellbare Pulslängen und Messgeschwindigkeiten, Robustheit, Kompaktheit und Kosteneffizienz. Dem gegenüber

stehen technische Hürden, welche die Verwirklichung der genannten Anforderungen erschweren. Beispielsweise benötigt ein System mit hoher Pulslänge leistungsstarke Piezotreiberelektronik. In dieser Arbeit wird eine vorgesteuerte Regelschleife demonstriert, die große Pulslängen bei hoher Messrate mit einer kompakten Piezotreiberelektronik ermöglicht. Das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte ECOPS System erreicht beispielsweise Pulslängen von 750 ps bei 200 Pulsspuren pro Sekunde, 340 ps bei 1000 Pulsspuren pro Sekunde und 230 ps bei 1000 Pulsspuren pro Sekunde. Die maximal demonstrierte Messrate des ECOPS Systems beträgt 10000 Pulsspuren pro Sekunde bei 40 ps Pulslänge.

In nahezu jedem Terahertz-Zeitbereich-System ist die Zeitachse des Terahertzpulses entweder von vornherein verzerrt oder kann durch äußere Einflüsse wie Vibratoren und Temperaturschwankungen gestört werden. In jedem Fall ist eine exakte Rekonstruktion und Linearisierung der Zeitachse nötig, um präzise Messergebnisse zu erzielen. Im ECOPS-System führt die nichtlineare Bewegung des Piezoaktors (mechanische Hysterese) zu einer Verzerrung. Deshalb ist eine präzise Kenntnis der Position des Piezoaktors für die Entzerrung der Zeitachse des Terahertzpulses notwendig. Für bestimmte Anwendungen z.B. im Bereich der industriellen Schichtdickenmessung von Kunststoffrohren muss die Entzerrung der Zeitachse in Echtzeit erfolgen. Dies ist eine besondere Herausforderung im schnellen Messbetrieb, weil die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Terahertz-Pulsspuren weniger als eine Millisekunde beträgt. Diese Arbeit demonstriert eine mögliche Lösung zur schnellen Rekonstruktion der Zeitachse. Zur Demonstration des Systems wird eine Probe mit Fließbandgeschwindigkeit (1,15 m/s) bewegt und die Schichtdicken werden in Echtzeit berechnet.

Darüber hinaus wird in dieser Arbeit das ECOPS System mit dem Stand der Technik—einem Zeitbereich-Spektrometer mit präzisem mechanischen Delay—verglichen. Dabei werden Spektren, Dynamikbereich und das Signal-Rausch-Verhältnis der Zeitsignale diskutiert. Beide Systeme zeigen vergleichbare Dynamikbereiche und Signal-Rausch-Verhältnisse auf ähnlichen Zeitskalen. Zudem wird der Jitter für das ECOPS System bestimmt. Der vom Jitter verursachte Fehler ist kleiner als ein Prozent der gesamten Pulslänge.

Anhand von drei Applikationsmessungen werden die Einsatzmöglichkeiten des ECOPS-Systems demonstriert. Zu den Anwendungen zählen Schichtdickenmessungen sowie material- und magnetospektroskopische Untersuchungen. Bei Schichtdickenmessungen wird die Genauigkeit der Messungen mit dem ECOPS einem herkömm-

lichen Terahertz-Zeitbereichssystem und einer mechanischen Mikrometerschraube gegenübergestellt. Die Ergebnisse aller drei Messmethoden stimmen gut überein. Die materialspektroskopische Messung wird mit einem ECOPS- und einem herkömmlichen System an einer Probe aus Polypropylen durchgeführt. Dabei werden Berechnungsindeks und Absorptionskoeffizient der Probe bestimmt. Die Resultate beider Systeme zeigen eine gute Übereinstimmung. Für die magnetospektroskopischen Messungen wird ein gepulster Magnet mit dem ECOPS-System kombiniert und eine weniger als 100 nm dünne Graphitschicht untersucht. Der kompakte Magnet kann bei Raumtemperaturen betrieben werden und erreicht eine maximale Magnetfeldstärke von 3 T. Die schnelle Messgeschwindigkeit von ECOPS von 5000 Pulsspuren pro Sekunde ermöglicht es in weniger als 2.3 ms (Halbwertsbreite des Magnetpulses) mindestens 13 Terahertz-Pulse zu erfassen.



## Acknowledgement

This dissertation presents the results of my work at TOPTICA Photonics AG as a doctoral candidate. During this period, I had great support from many people to whom I would like to show my appreciation.

First of all, I would like to express my gratitude to Prof. Dr. Bernhard Schmauß, who paved the road of my journey by supervising this work. I also had the pleasure to have his supervision in my master's thesis and attend his lectures in my master studies.

When I joined TOPTICA for my internship in October 2013, I was new to the terahertz field. Yet, I have come a long way to earn a Ph.D. degree in this field! This would not have come true without Dr. Nico Vieweg, my supervisor at TOPTICA. He shared his comprehensive knowledge of the terahertz field, devoted his time for long and fruitful technical discussions, offered essential proofreading, and taught me patience in tough situations. All that he offered was crucial for my journey to reach its end. Thank you for everything, Nico!

I would like to thank Dr. Patrick Leisching, vice president of TOPTICA, for offering the opportunity of the doctoral position! His permanent support to the terahertz group in the company and his ever-precious trust have been great sources of motivation.

I have received immense and diverse support from my colleagues, including in experiments, software, and proofreading. Therefore, I would like to thank Katja Dutzi, Dr. Anselm Deninger, Manfred Hager, Dr. Thomas Puppe, Angelika Jahn, Dr. Robert Herda, Dr. Nadja Regner, Dr. Christian Rausch, Reinhard Unterreitmayr, Paul Rehme, and Simeon Brinkmann. The proofreading of the terahertz antenna section by Robert Kohlhaas of the Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institute (HHI) in Berlin has been immensely helpful.

All of the financial means for this work were provided by TOPTICA. Therefore, I offer a special thanks to the executive board: Dr. Wilhelm Kaenders, Dr. Thomas Renner, and Dr. Thomas Weber. I really appreciate having such comprehensive technical equipment and a flexible working schedule and more importantly to experience the friendly atmosphere at TOPTICA. It has been a pleasurable environment for completing my Ph.D.!

I would like to thank Prof. Jéan Leotin and Bruno Camargo from the Laboratoire

National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) in Toulouse, France, for their collaboration in the magnetospectroscopy experiment.

Last but not least, I would like to thank my family for their superb support during my entire education.

Milad Yahyapour  
Munich, December 2019

## List of Abbreviations

ASOPS	Asynchronous optical sampling
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
DAQ	Data acquisition
DCF	Dispersion compensating fiber
DR	Dynamic range
ECOPS	Electronically controlled optical sampling
EDF	Erbium doped fiber
FD	Frequency domain
FFT	Fast Fourier transformation
FTIR	Fourier-transform infrared spectrometers
FWHM	Full width at half maximum
GaAs	Gallium arsenide
HBT	Heterojunction bipolar transistors
HEMT	High electron mobility transistors
InAlAs	Indium aluminium arsenide
InGaAs	Indium gallium arsenide
InP	Indium phosphide
LIDAR	Light detection and ranging
LNCMI	Laboratoire national des champs magnétiques intenses
MBE	Molecular beam epitaxy
OCT	Optical coherence tomography
OSCAT	Optical sampling by cavity tuning
PID	Proportional-integral-derivative
RMS	Root mean square
SDK	Software development kit
SESAM	Semiconductor saturable absorber mirror
SLAPCOPS	Single-laser polarization-controlled optical sampling
SNR	Signal-to-noise-ratio
TASOPS	Timed asynchronous optical sampling
TD	Time-domain
TIA	Transimpedance amplifier
VDI	Verein Deutscher Ingenieure



---

## Contents

---

<b>Abstract</b>	v
<b>Zusammenfassung</b>	ix
<b>Acknowledgement</b>	xiii
<b>List of Abbreviations</b>	xv
<b>Contents</b>	xvii
<b>1. Introduction</b>	1
<b>2. Different Fast Terahertz Time-Domain Systems</b>	9
2.1 Asynchronous Optical Sampling (ASOPS)	15
2.2 Optical Sampling by Cavity Tuning (OSCAT)	19
2.3 Electronically Controlled Optical Sampling (ECOPS)	22
2.4 Summary	24
<b>3. ECOPS Terahertz Time-Domain System</b>	27
3.1 System Schematic	27
3.2 Lasers	29
3.3 Terahertz Antennas	32

3.3.1	Photoconductive Terahertz Emission and Detection . . . . .	33
3.3.2	Key Improvements in Performance of InGaAs Terahertz Photoconductive Antennas . . . . .	35
3.4	Electronics . . . . .	40
3.4.1	Phase Detector . . . . .	41
3.4.2	Piezo Actuator and Voltage Amplifier . . . . .	42
3.5	Summary . . . . .	45
<b>4.</b>	<b>High Scan Ranges at High Measurement Rates . . . . .</b>	<b>47</b>
4.1	Challenges in Achieving the Scan Range Requirements . . . . .	49
4.2	System with Two Piezo Actuators and a Modulation Unit . . . . .	52
4.3	System Demonstration After Improvements . . . . .	57
<b>5.</b>	<b>Time Axis Linearization of the Terahertz Pulse Trace . . . . .</b>	<b>63</b>
5.1	Introduction . . . . .	64
5.2	Controlling the Piezo Displacement . . . . .	66
5.3	Extension of the Modulation Unit . . . . .	69
5.4	Demonstration of the New Modulation Unit . . . . .	72
5.5	Inline Thickness Measurement . . . . .	72
<b>6.</b>	<b>System Performance . . . . .</b>	<b>77</b>
6.1	Terahertz Spectrum . . . . .	78
6.2	Dynamic Range and Signal-to-Noise-Ratio in Time Domain . . . . .	79
6.3	Jitter . . . . .	82
6.4	Summary . . . . .	87
<b>7.</b>	<b>Applications . . . . .</b>	<b>89</b>
7.1	Thickness Measurement . . . . .	89
7.2	Material Spectroscopy . . . . .	91
7.3	Terahertz Time-Domain Magnetospectroscopy . . . . .	93
7.3.1	Compact Room-Temperature Pulsed Magnet . . . . .	94
7.3.2	Proof-of-Principle Terahertz Time-Domain Magnetospectroscopy Experiment . . . . .	96
7.4	Summary . . . . .	98
<b>8.</b>	<b>Conclusion and Future Work . . . . .</b>	<b>101</b>

---

<b>Appendices . . . . .</b>	<b>105</b>
<b>A. IQ Demodulator and IQ Modulator . . . . .</b>	<b>107</b>
<b>Bibliography . . . . .</b>	<b>111</b>