

ABSCHLUSSBERICHT

I Allgemeine Angaben

1. DFG-Geschäftszeichen: HO 1973/19-3, MU 3507/2-3, KN 1333/1-3

2. Projektnummer: 668053, 668051, 236759088

3. Titel des Projekts: Asynchron optisch abtastendes gepulstes THz-TDS-Spektroskopiesystem auf Basis monolithisch modengekoppelter Laserdioden

4. Name(n) des/r Antragstellenden: Prof. Dr. Martin Hofmann(1), Prof. Dr. Thomas Musch(2), Dr. Andrea Knigge (3)

5. Dienstanschriften: (1) Lehrstuhl für Photonik und Terahertztechnologie, Ruhr-Universität Bochum, D-44780 Bochum (PTT)

(2) Lehrstuhl für Elektronische Schaltungstechnik, Ruhr-Universität Bochum, D-44780 Bochum (EST)

(3) Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, Gustav-Kirchhoff-Str. 4, 12489 Berlin (FBH)

Berichtszeitraum (gesamte Förderdauer): 01.01.2021 bis 31.05.2024

6. Liste der wichtigsten Publikationen aus diesem Projekt:

a) Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

[1] Shulin Wohlfeil, Heike Christopher, Jörg Fricke, Hans Wenzel, Andrea Knigge, and Günther Tränkle. "Picosecond pulses with 40 W peak power from a passively mode-locked tapered quantum well laser." *Electronics Letters* 59.4 (2023): e12736.

(Link: <https://doi.org/10.1049/ell2.12736>)

[2] Shulin Wohlfeil, Jan-Philipp Koester, Hans Wenzel, and Andrea Knigge. "Spatio-temporal modeling and simulation of a mode-locked tapered semiconductor diode laser." *New Journal of Physics* (accepted).

(Link: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ada6f7>)

[3] R. Kaesbach, M. van Delden and T. Musch, "A Fixed-Frequency, Tunable Dielectric Resonator Oscillator With Phase-Locked Loop Stabilization," 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Yokohama, Japan, 2022, pp. 728-730, doi: 10.23919/APMC55665.2022.9999910.

[4] R. Kaesbach, M. van Delden and T. Musch, "A Tunable Dielectric Resonator Oscillator with Phase-Locked Loop Stabilization for THz Time Domain Spectroscopy Systems," *IEICE Transactions on Electronics*, 2023, Volume E106.C, Issue 11, Pages 718-721, doi: 10.1587/transele.2023MMS0004.

b) Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse

[5] Shulin Wohlfeil, Heike Christopher, Jörg Fricke, Pietro Della Casa, Andre Maaßdorf, Hans Wenzel, Andrea Knigge, and Günther Tränkle. "Generation of picosecond pulses from tapered laser diodes with over 40 W peak power at wavelengths of 780 nm and 830 nm." 2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC).

(Link: <https://zenodo.org/records/14505842>)

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Kennedyallee 40 · 53175 Bonn · Postanschrift: 53170 Bonn

Telefon: + 49 228 885-1 · Telefax: + 49 228 885-2777 · postmaster@dfg.de · www.dfg.de

The logo of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), consisting of the letters 'DFG' in a bold, blue, sans-serif font.

[6] Shulin Wohlfeil. "Picosecond pulses with 40 W peak power from a mode-locked tapered laser diode emitting at 830 nm." Workshop Nonlinear Dynamics in Semiconductor Lasers (NDSL) 2023.

(Link: <https://www.wias-berlin.de/WCMS/showabstract.jsp?NDSL23-p-0051>)

[7] Lisa C. Kreuzer, Annamarija Starsaja, Robin Kaesbach, Shulin Wohlfeil, Nils Surkamp, Niklas Schulz, Marcel van Delden, Carsten Brenner, Hans Wenzel, Thomas Musch, Andrea Knigge and Martin R. Hofmann, Characterization of Monolithic Mode-Locked Ridge Waveguide Laser Diodes for THz ASOPS Application, 2024 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Bali, Indonesia, 2024.

c) Patente (angemeldete und erteilte)

-

II Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

1. Ausgangsfragen und Zielsetzung

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines kompakten, leistungsstarken THz-TDS-Systems (Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie) auf Basis monolithisch modengekoppelter Laserdioden. Dieses System sollte eine hohe spektrale Bandbreite, kompakte Bauweise und Kosteneffizienz kombinieren, um industrielle Anwendungen in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, Materialcharakterisierung und Sicherheitsanalytik zu ermöglichen.

Ein Schlüsselaspekt der Zielsetzung war die Verbesserung der Laserdiodentechnologie durch hybride Modenkopplung, um kurze Pulsdauern, hohe Ausgangsleistungen und eine reduzierte Jitterrate zu erreichen. Dies wurde als essenziell angesehen, um die THz-Generierung über photoleitende Antennen effizient zu gestalten. Im Mittelpunkt standen drei Hauptziele:

1. **Laseroptimierung:** Untersuchung und Optimierung von Laserdioden mit verschiedenen Absorberlängen (100 μm und 200 μm), um ihre Eignung für die Erzeugung starker, breitbandiger THz-Signale zu validieren. Diese Arbeit umfasste sowohl elektro-optische Charakterisierung als auch die Anpassung der Modenkopplung.
2. **Integration der Pulscompression:** Da die Laserdioden stark gechirpte Pulse erzeugen, war die Integration optischer Pulscompressoren entscheidend, um Pulsbreiten unter 500 fs zu realisieren. Die Kompression ermöglicht eine signifikante Steigerung der THz-Bandbreite und verbessert die Systemleistung.
3. **Entwicklung eines Systems für industrielle Anwendungen:** Das Ziel war, ein leicht skalierbares und robustes THz-TDS-System zu entwickeln, das in der Praxis eingesetzt werden kann. Besondere Anforderungen lagen in der Miniaturisierung und der Gewährleistung eines hohen Signal-Rausch-Verhältnisses.

Insgesamt lag ein starker Fokus darauf, technologische Hindernisse wie die Variation von Absorberlängen, den optischen Chirp und die Stabilität der Repetitionsfrequenz zu lösen, um ein marktreifes System zu entwickeln.

2. Zusammenfassung

s. III

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse werden im Folgenden für die einzelnen Partner dargestellt:

Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH)

Um die im Projekt benötigten Laserdioden zur Verfügung zu stellen, wurden am FBH zwei Wafer-Prozesse durchgeführt. Dabei haben wir verschiedene Konfigurationen umfassend untersucht, darunter verschiedene Epitaxie-Strukturen wie Single Quantum Well (SQW)- und Double Quantum Well (DQW)-Konfigurationen, verschiedene Modenkopplungsansätze wie die Position von sättigbaren Absorbern (ACPM, Absorber an der vorderen Facette, und SCMP, Absorber an der hinteren Facette), verschiedene Bauteilgeometrien (Ridge-Waveguide-Laser (RWL), Trapez-RW-Laser (TRWL) und Trapez Laser (TPL)) sowie verschiedene Montageoptionen. Ergänzend zu den experimentellen Arbeiten haben wir detaillierte Simulationen zu TPLs durchgeführt, um tiefere Einblicke in deren physikalische Eigenschaften zu gewinnen. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Mess- und Simulationsergebnisse dargestellt.

Monolithisch hybrid modengekoppelte Trapezlaser

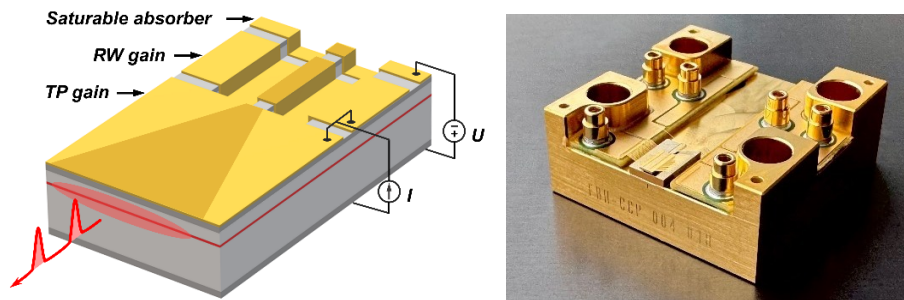


Abbildung 1 Schema eines TPL (links) und eines auf einem CCP montierten TPL (rechts)

Abbildung 1 zeigt ein typisches Design von TPLs. Der Laser ist 6 mm lang und besteht aus einer 200 μm langen sättigbaren RW-Absorber-Sektion, einer RW-Gewinn-Sektion von 2 mm zur Modenfilterung und einer TP-Gewinn-Sektion von 3,8 mm zur Leistungssteigerung. Der RW ist 5 μm breit, während der TP-Sektion einen vollen Trapezwinkel von 4° aufweist. Dies ist eine SCPM-Konfiguration mit einer 1% Frontbeschichtung und einer 98% Rückbeschichtung. Zur Wärmeableitung werden TPLs mit einem CuW-Submount in ein Conduction-Cooled-Package (CCP) montiert, wobei ein zusätzlicher Wärmespreizer auf dem TP-Abschnitt angebracht ist. Der Absorber wird mit einer Sperrspannung (U) betrieben, während die Gewinn-Sektionen mit einem Gewinnstrom (I) versorgt werden.

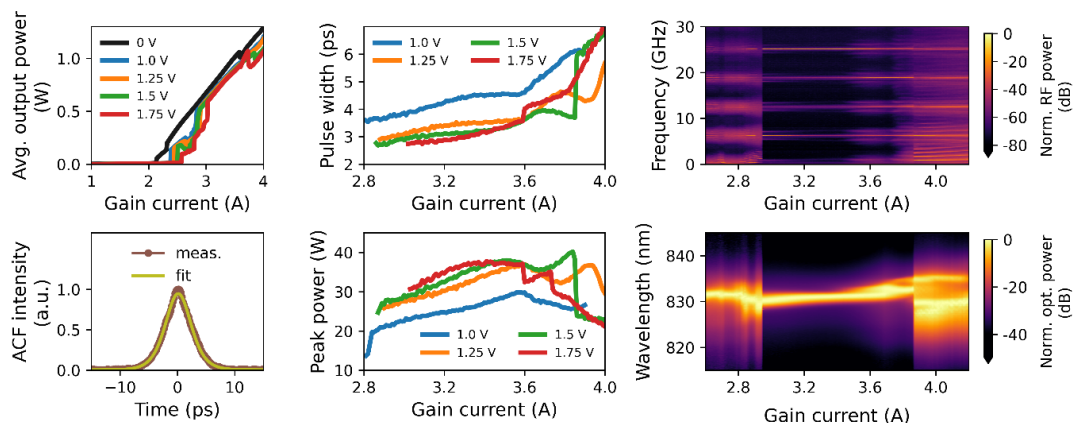


Abbildung 2 Charakterisierung eines TPLs: Leistungs-Strom-Kurven (oben links); Beispiel einer gemessenen Autokorrelationskurve und ihr Fit mit einer Gauß-Funktion (unten links); Pulsbreite und die entsprechende Spitzenleistung unter verschiedenen Betriebsbedingungen (mitte); RF- und optischen Spektren für eine Sperrspannung $U = 1,5$ V (rechts).

Abbildung 2 stellt die wesentlichen Charakterisierungen eines TPL dar. Der Laser tritt in den Betrieb bei einem Strom von etwa 2–2,5 A, wobei die Ausgangsleistung mit zunehmender Sperrspannung leicht abnimmt. Der zeitliche Verlauf der emittierten Pulse wurde indirekt mittels der Autokorrelationsfunktion gemessen, wobei ein exemplarisches Beispiel einer solchen Messkurve präsentiert wird. Darüber hinaus werden die berechneten Pulscharakteristiken in Abhängigkeit vom Gewinnstrom und der Sperrspannung dargestellt, einschließlich der entsprechenden Puls-Spitzenleistungen. Der TPL erzeugt kurze Pulsen mit einer Dauer von etwa 3 ps und erreicht eine Spitzenleistung von etwa 40 W. Ein Beispiel des Radio-Frequenz (RF) Leistungsspektrums verdeutlicht, dass die emittierten Pulse eine fundamentale Wiederholrate von 6,3 GHz aufweisen. Die Emissions-Wellenlänge beträgt etwa 830 nm, mit einer 3-dB-Spektralbandbreite von ungefähr 1 nm. Die Spektraldaten legen nahe, dass der TPL in einem stabilen Mode-Locking zwischen 3 und 3,6 A arbeitet, was mit dem Bereich korreliert, in dem

Pulsen mit einer Dauer von etwa 3 ps erzeugt werden. Bemerkenswert ist, dass die emittierten Pulse ein ausgeprägtes Chirp (zeitliche Änderung der Frequenz) aufweisen, mit einem Zeit-Bandbreiten-Produkt von mehr als 1, was sie für eine anschließende Kompression geeignet macht. In diesem Projekt zeigten die SQW-Epitaxie-Struktur und ACMP-Konfiguration gute Leistung bei RWLs, erwiesen sich jedoch als ungeeignet für TPLs aufgrund des geringen modalen Gewinns. Unabhängig von der Geometrie der Bauelemente erreichten alle Laser ein stabiles Modenkoppeln mit Pulslängen von ~ 3 ps. Bemerkenswert war der signifikante Unterschied in der Spitzenleistung zwischen den RW- und TP-Designs: 3-mm lange RWLs erzeugten eine Spitzenleistung von 1 W, während 3-mm lange TPLs 8 W erreichten. Bei 6-mm langen Lasern stieg die Spitzenleistung durch Integration eines TP-Abschnitts von 4 W auf 40 W, was einer zehnfachen Leistungssteigerung entspricht. Die Ergebnisse wurden in [1] und [5] veröffentlicht.

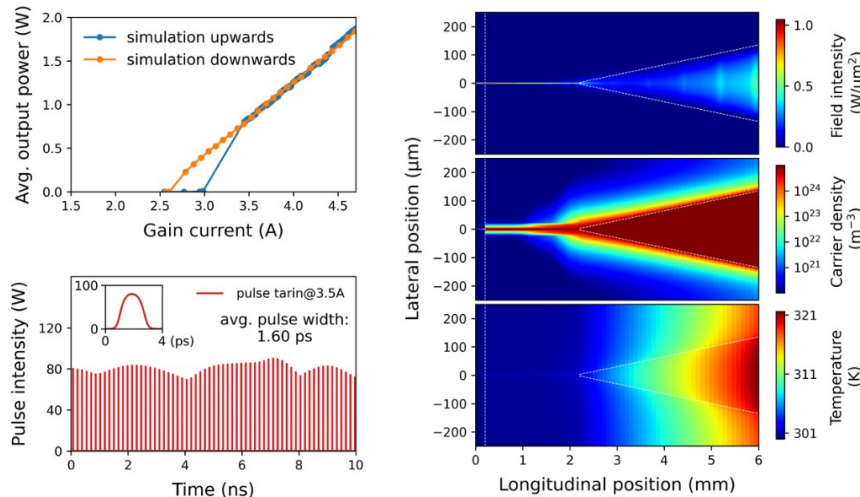


Abbildung 3 Simulationsergebnisse: Leistung-Strom-Kurve mit Bistabilität knapp oberhalb der Laserschwellen (oben links); Beispiel eines erzeugten Pulszugs und eines einzelnen Pulses (unten links); über 10 ns zeitlich gemittelte Feldintensität, Ladungsträgerdichte und Temperatur innerhalb der Kavität (rechts).

Zusätzlich wurden TPLs mit einem vorhandenen numerischen Tool simuliert, um ein tieferes Verständnis ihres Verhaltens zu gewinnen. Das Simulationstool löst die zeitabhängigen Wanderwellengleichungen unter Berücksichtigung der lateralen Wellenführung und Beugung, Gleichungen für den Ladungsträgertransport und eine stationäre Wärmeleitungsgleichung. Abbildung 3 zeigt die simulierte Leistung-Strom-Kurve des TPL, den emittierten Pulszug sowie ein Beispiel eines einzelnen emittierten Pulses. Die Simulation zeigt, dass die Feldintensitätsverteilung in der TP-Sektion kleiner ist als die TP-Kontaktregion, was mit der Ladungsträgerdichte an den inneren Rändern korreliert. Ladungsträgerakkumulation außerhalb der Kontaktregion führt zu starker Wechselwirkung des Pulses mit den Rändern, insbesondere im Übergang von der TP- zur RW-Region. Die Temperaturverteilung weist auf eine Überhitzung der Frontfläche hin, die thermische Linsenwirkung und eine Verengung des Nahfelds verursacht. Diese Ergebnisse betonen die Wichtigkeit effektiver Wärmeableitungsstrategien, wie eines Submounts über der TP-Region und einer CCP-Montage, für den effizienten Betrieb von TPLs. Sie wurden in [2] und [6] veröffentlicht.

Integration von Sender- und Empfängerlaser auf einem Chip (FBH)

Abbildung 4 zeigt das Konzept zweier Laser auf einem Chip mit gemeinsamer Kontaktierung für Gewinn- und Absorbersektion. Im Mode-Locking-Betrieb erzeugt der gerade RWL Pulse mit einer Wiederholfrequenz von f_0 , während der S-Bend-Laser mit einem lateralen Versatz w_s der Rippenwellenleiter an Front- und Rück-Facette Pulse liefert, deren Wiederholfrequenz

um die Frequenzverstimmung Δf kleiner ist. Für Demonstrationszwecke wurden die Laser einzeln auf C-Mounts montiert.

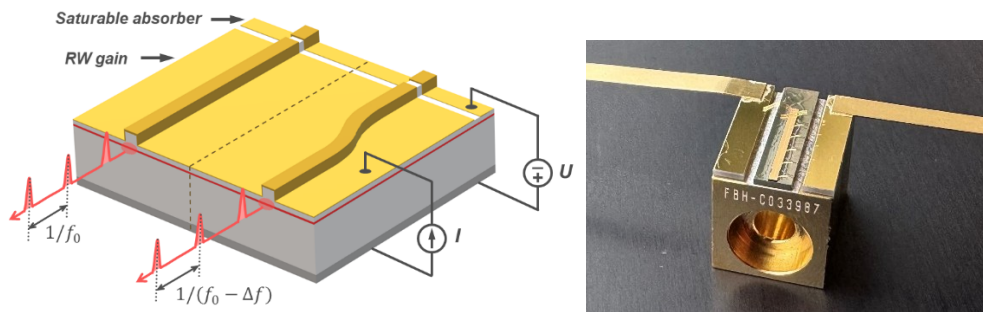


Abbildung 4 Schematische Darstellung eines Bauelements mit zwei mode-gekoppelten RW-Lasern: einer mit einem geraden Wellenleiter und einer mit einem S-Bend (links). Ein einzelner Laser, montiert auf einer C-Mount-Halterung (rechts).

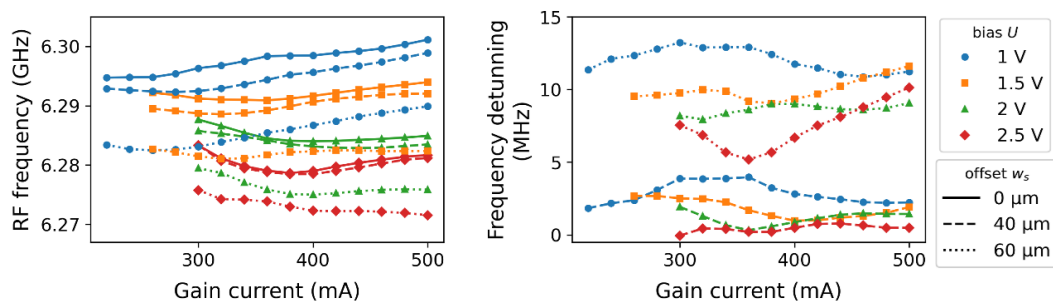


Abbildung 5 RF-Frequenz von drei Lasern mit unterschiedlichen S-Bend-Versatzwerten (durch Linienstil dargestellt) und unter verschiedenen Vorspannungsbedingungen (durch Farben und Marker gekennzeichnet) (links); die entsprechende Frequenzverstimmung (rechts).

Abbildung 5 illustriert die Wiederhoffrequenz von drei RWLs sowie die zugehörige Frequenzverstimmung Δf für zwei S-Bend-Konfigurationen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen. Allgemein führt ein größerer Versatz zu einer stärkeren Frequenzverstimmung: Für einen S-Bend mit einem Versatz von 40 μm wird eine maximale Frequenzverstimmung von etwa 4 MHz erreicht, während bei einem Versatz von 60 μm die Verstimmung sogar über 10 MHz liegen kann. Innerhalb derselben S-Bend-Konfiguration nimmt der Verstimmungseffekt mit zunehmender Sperrspannung ab. Es ist geplant, die Ergebnisse zu publizieren.

Lehrstuhl für Elektronische Schaltungstechnik (EST)

Messung des Rauschverhaltens der Laserdioden

Zur Auslegung der elektronischen Ansteuerung für die hybride Modenkopplung muss der Jitter bzw. das additive Phasenrauschen der Laser bekannt sein. Dazu wurden verschiedene Laserdioden mit Hilfe eines Phasenrauschmessplatzes (FSWP50) charakterisiert. Das Referenzsignal wurde mit variabler Frequenz und Leistung auf die Laserdiode gegeben, deren optischer Pulszug dann mit einer schnellen Photodiode erfasst und vom Phasenrauschmessplatz analysiert wurde (s. Abb. 6 links). Wie in Abb. 1 rechts zu erkennen, ist mit steigender HF-Leistung das Einsetzen der hybriden Modenkopplung deutlich sichtbar. Höhere Leistungen verbessern das Rauschen danach nicht mehr signifikant. Allerdings vergrößert sich der Frequenzbereich, indem die Modenkopplung auftritt (s. Abb. 6 rechts). Zu große HF-Leistungen können sich jedoch negativ auf die Form der optischen Pulse auswirken.

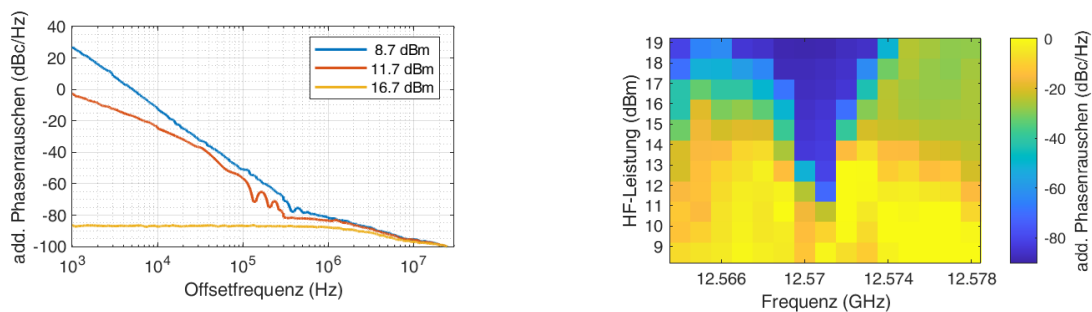


Abbildung 6: Additives Phasenrauschspektrum eines 3 mm Lasers bei 12,57 GHz und verschiedenen HF-Leistungen (links) sowie bei 10 kHz Offset (rechts).

Optimierung und Aufbau des DRO

Die allgemeine Eignung eines dielektrischen Resonators als rauscharmer Oszillator (DRO) für ASOPS-Anwendungen konnte bereits in Vorarbeiten gezeigt werden, jedoch nicht als breitbandig abstimmbarer Aufbau. Der Resonator wurde daher zunächst simulatorisch und messtechnisch über verschiedene mechanische Parameter charakterisiert. Dabei wurden fixe Designentscheidungen wie der Cavity-Durchmesser und die Ankopplung an die dielektrische Pille untersucht, um durch alleinige Variation der Cavity-Höhe einen optimalen Betriebsbereich abdecken zu können. Generell führen breitere und höherfrequente Frequenzbereiche zu geringeren Güten.

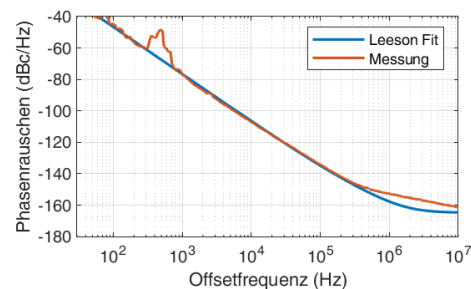
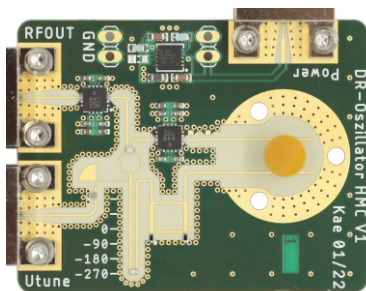


Abbildung 7: Aufgebauter DRO ohne Cavity (links) und Phasenrauschen bei 12,8 GHz (rechts).

Über die Cavity-Höhe lies sich eine mechanische Verstimmung von etwa 250 MHz bzw. 2,8 % erreichen. Das Konzept der Frequenzbandauswahl durch Tauschen des metallischen Cavity-Abschlusses gegen einen dielektrischen Abschluss wurde zunächst simulatorisch detailliert untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass der dielektrische Abschluss zu unerwünschten Cavity-Moden mit geringer Güte führt, welche einen breiten Verstimmbereich unmöglich machen. Verschiedene kommerzielle ICs und ein eigens entwickelter breitbandiger Verstärker-MMIC wurden hinsichtlich ihres additiven Phasenrauschens und weiterer Parameter für die Eignung im Oszillator vermessen und im realen Aufbau getestet. Schließlich wurde ein kompakter Prototyp eines Oszillators mit dem optimierten dielektrischen Resonator auf einem Platinensubstrat realisiert (s. Abb. 7 links). Bei einer Ausgangsfrequenz von 12,8 GHz erreichte er eine Güte von 3562 und ein Phasenrauschen von -107,2 dBc/Hz bei 10 kHz Trägerabstand (s. Abb. 7 rechts), was ihn zwischen einfachen LC-Resonatoren und hochgütigen Saphir-Resonatoren einordnet.

Elektronische Abstimmung und PLL-Stabilisierung des DRO

Der entwickelte freilaufende Resonator unterliegt thermischem und mechanischem Drift und muss für den ASOPS-Betrieb auf eine exakte Frequenz eingestellt und gehalten werden. Dazu ist ein elektronischer Abstimm-Mechanismus und eine stabilisierende Phasenregelschleife

notwendig. Die zu steuernde Frequenzvariation ist klein und liegt im Bereich weniger 100 kHz, die Regelbandbreite muss jedoch hoch sein. Dies schließt mechanische Abstimmverfahren generell aus. Stattdessen wurde eine Abstimmung des Oszillators mittels elektronischem Phasenschieber, bestehend aus einem Koppler und Varaktordioden, entwickelt.

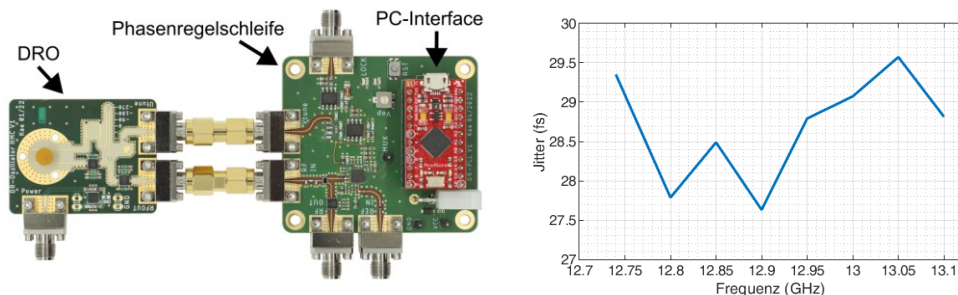


Abbildung 8: Phasenregelschleife stabilisierter DRO (links) und gemessener Jitter (rechts).

Dieser bringt den Resonator unter Einhaltung der Schwingbedingung in einen anderen Arbeitspunkt, sodass die Oszillationsfrequenz in der Größenordnung der 3 dB-Bandbreite variiert werden kann. Damit ist hier eine Verstimmung um etwa 2 MHz möglich. Für die Phasenregelschleife wurde ein kommerzieller PLL-IC mit externem Schleifenfilter verwendet, welcher den Oszillator an einen 100 MHz-Ofenquarz anbindet und eine sub-Hertz genaue Programmierung der Frequenz ermöglicht. Falls notwendig, muss der Oszillator durch mechanische Verstimmung der Cavity in den Fangbereich der PLL gebracht werden. Um diese manuelle Abstimmung zu automatisieren wurde eine mechanische Verstimmung mittels Ultraschallmotor getestet. Als Steuersignal dient die Abstimmspannung der PLL, welche von einem Regler überwacht und in ein Bewegungssignal für den Motor umgesetzt wird. Durch die PLL konnte der Jitter (Integration von 100 Hz bis 1 MHz) des freilaufenden Oszillators im Bereich 12,7...13,1 GHz von etwa 2 ps auf 29 fs reduziert werden. Diese Realisierung und Vermessung wurde in einem Konferenzbeitrag [3] und einer Zeitschrift [4] veröffentlicht.

Bias- und HF-Einkopplung am Laser

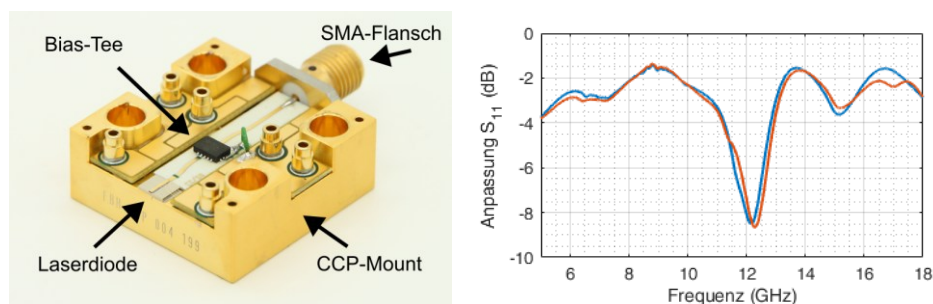


Abbildung 9: Laserdiode auf einem CCP-Mount mit HF-Einkoppelstruktur und gemessene Anpassung zweier 3 mm Lasermodule (rechts).

Aufgrund der hohen Gainströme der im Projekt eingesetzten Laserdioden wurde für die mechanische Basis auf eine Messinghalterung (CCP-Mount) mit AlN-Isolator gewechselt. Dabei konnten einige wichtige mechanische und elektrische Aspekte optimiert werden. In der neuen Lösung (s. Abb. 9 links) wird das speisende Koaxialkabel an einen SMA-Flansch angeschlossen. Das HF-Signal wird dann über ein Substrat impedanzangepasst an die Laserdiode geführt, wo es mittels kurzer Bonddrähte in die Absorbersektion einkoppelt. Durch diesen Aufbau ergibt sich eine phasenstarre Verbindung, welche auch bei wiederholtem Anschluss ein reproduzierbares Verhalten sicherstellt. Für den DC-Bias wurde auf dem

Platinensubstrat ein breitbandiges Bias-Tee integriert, sodass externe Komponenten entfallen. Durch die gute Effizienz (s. Abb. 9 rechts) waren zusätzliche Anpassnetzwerke nicht notwendig.

Reflektometer

Um die Reflexionseigenschaften der Laserdiode unter verschiedenen Arbeitspunkten zu analysieren wurde ein Reflektometer entwickelt. Besonders ist hierbei, dass für die Messung kein eigenes Signal benötigt wird, sondern Quell- und Reflexionssignal über Leitungskoppler zwischen der Signalquelle und der Laserdiode ausgekoppelt werden. In der ersten Iteration (s. Abb. 10 links) erfolgte die Messung heterodyn über modulare Komponenten und einem Mikrocontroller zur Digitalisierung. Mit diesem Aufbau wurde eine Sensitivität von < -10 dBm und eine Bandbreite von 7...14 GHz erreicht. Die Richtigkeit der Messwerte wurde durch ein Testsubstrat und Messungen mit einem NWA verifiziert. Nach dieser Demonstration wurde der Reflektometeraufbau auf eine Platine integriert (s. Abb. 10 rechts). Hier wurde ein homodynes System gewählt, damit der externe Signalgenerator entfällt. Ein einstellbares Dämpfungsglied und Verstärker erlauben eine Variation der Leistung an der Laserdiode von $-10...20$ dBm.

PLL für kleine Offsets

Zur Frequenzstabilisierung der Laserdioden wird eine PLL-Struktur eingesetzt welche für kleine Frequenzoffsets der Ausgangssignale optimiert ist. Für die Teiler und den Phasen-Frequenz-Detektor werden eigens entwickelte Synthesizer-MMICs verwendet, da sie ein deutlich geringeres Rauschen aufweisen, als kommerziell verfügbare Komponenten.

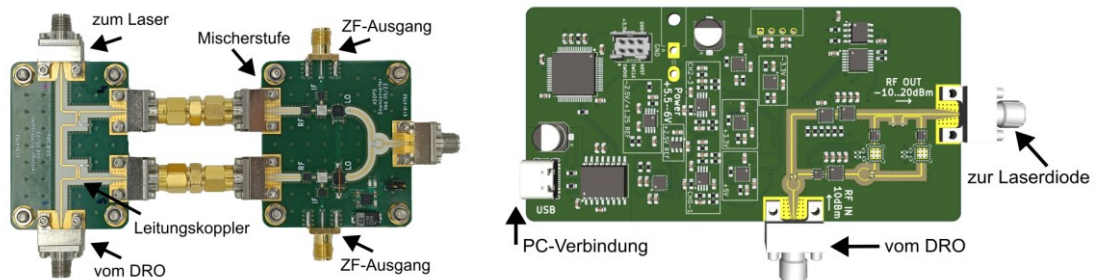


Abbildung 10: Erste Iteration des Reflektometers aus Einzelkomponenten (links) und kompakte zweite Iteration (rechts).

Die Funktionsblöcke der PLL wurden auf Platinen realisiert, welche die HF-Teiler und den Phasen-Frequenz-Detektor mit Schleifenfilter beinhalten (s. Abb. 11). Der Aufbau konnte bereits mit dem entwickelten DRO getestet werden und es konnte eine stabile Phasenregelung demonstriert werden.

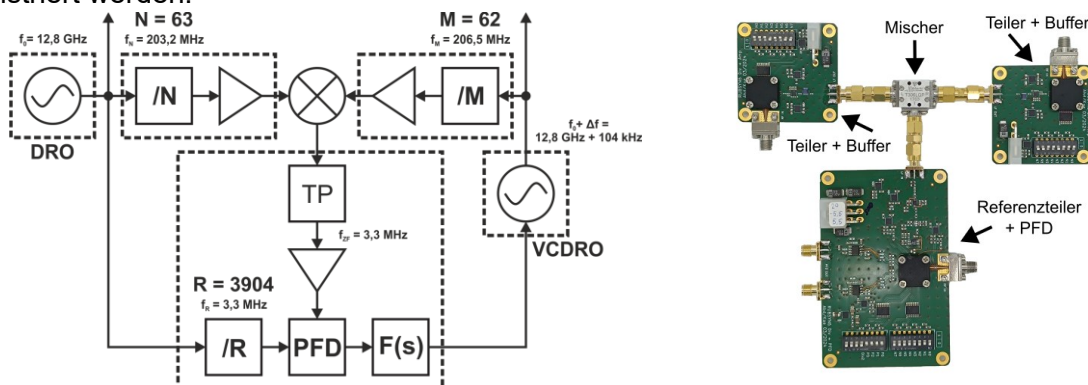


Abbildung 11: Blockschaltbild (links) und realisierter modularer Aufbau (rechts) der PLL für kleine Offsets. Platinenmodule: gestrichelt, MMICs unter den schwarzen Abdeckungen.

Lehrstuhl für Photonik und Terahertztechnologie (PTT)

Der Lehrstuhl für Photonik und Terahertztechnologie trug im Rahmen des Projekts die Verantwortung für die Charakterisierung der MLLDs, die Systemintegration sowie die Evaluierung der Anwendungsszenarien.

Ein wesentlicher Arbeitsbereich stellte die detaillierte Charakterisierung der monolithisch modengekoppelten Laserdioden dar. Dies beinhaltete die Analyse der optischen Eigenschaften der Laserdioden, darunter die Untersuchung der Pulsbreiten, der spektralen Bandbreiten sowie der Modulationsstabilität. Des Weiteren wurde das thermische Verhalten der Laserdioden sowie deren Temperaturempfindlichkeit und Kühlungseffizienz analysiert. Ein weiterer Fokus lag auf der Analyse des Phasenjitters sowie der Stabilität der Pulswiederholfrequenz.

Im Rahmen der Systemintegration wurde ein Zwei-Laser-System implementiert. In diesem Zusammenhang wurde einer der Laser zur Steuerung der THz-Emission über eine photoleitende Antenne eingesetzt, während der zweite Laser zur asynchronen Abtastung der Signale diente. Im Rahmen der Systemintegration wurden optische Komponenten wie Kollimationslinsen, Fasern und Antennen integriert und präzise justiert, um eine optimale Systemleistung zu gewährleisten.

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass nicht alle Lasergeometrien für die geplanten Systeme geeignet sind. Die Laserdioden mit getaperten Gainsegmenten (TPL) konnten letztlich nicht erfolgreich hybrid modengekoppelt werden. Bei den Laserdioden mit linearen Gainsegmenten (RWL) erwies sich die Länge des sättigbaren Absorbers als entscheidend. Die Laser mit 200 μm langen Absorbern waren denen mit 100 μm langen in allen untersuchten Punkten überlegen. Die umfassende Charakterisierung der Laser umfasste die Messung von Pulsbreiten, spektralen Breiten, Ausgangsleistungen sowie deren Durchstimmbarkeit. Die 100 μm Laser zeigten letztlich eine zu geringe, die 200 μm Laser dagegen eine deutlich größere spektrale Bandbreite, die zu einer theoretisch möglichen Pulslänge von etwa 133 fs führte.

Die Durchstimmbarkeit der Repetitionsfrequenz des Lasers wurde durch das Anlegen eines RF-Signals am Absorber realisiert. Die Verwendung der Laser für ASOPS erfordert eine präzise Kontrolle der Frequenzverschiebung. Die Realisierung der Abtastung unter diesem Prinzip bedingt eine Durchstimmbarkeit von etwa 100 kHz.

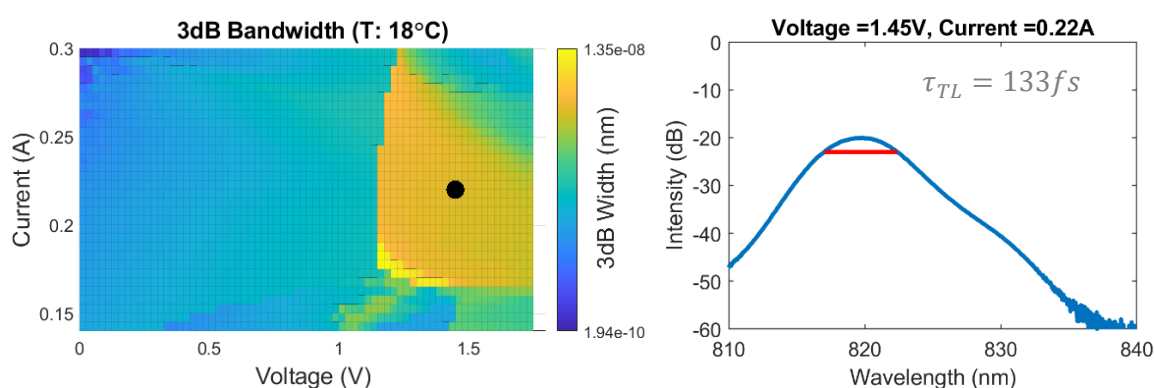


Abbildung 12: 3dB-Bandbreiten und ein Spektrum von einem 200 μm Laser bei einer Temperatur von 18°C.

Die 200- μm -Laser hingegen ermöglichen eine deutlich erweiterte Frequenzverstellung mit einem gemessenen Maximum von etwa 30 MHz. Im Vergleich dazu zeigten die 100- μm -Laser eine begrenzte spektrale Breite, eine geringere Durchstimmbarkeit sowie längere theoretische

Pulse, was sie für Anwendungen mit strengen Anforderungen an die Pulsdauern ungeeignet macht. Ein wesentlicher Bestandteil der Analyse bildete der Vergleich der theoretischen und experimentellen Pulsweite. Die theoretischen Werte wurden auf Basis der spektralen Breite berechnet, während die experimentellen Daten mittels Autokorrelationsmessungen erhoben wurden. Der Vergleich der gemessenen mit den theoretischen Werten ergab, dass die gemessenen Werte deutlich über den theoretischen Werten lagen. Dies lässt den Schluss zu, dass die Pulse einen hohen Chirp aufweisen. Im Rahmen der Optimierung wurde ein optischer Kompressor entwickelt, dessen vollständige Implementierung zum Projektzeitpunkt jedoch noch ausstand.

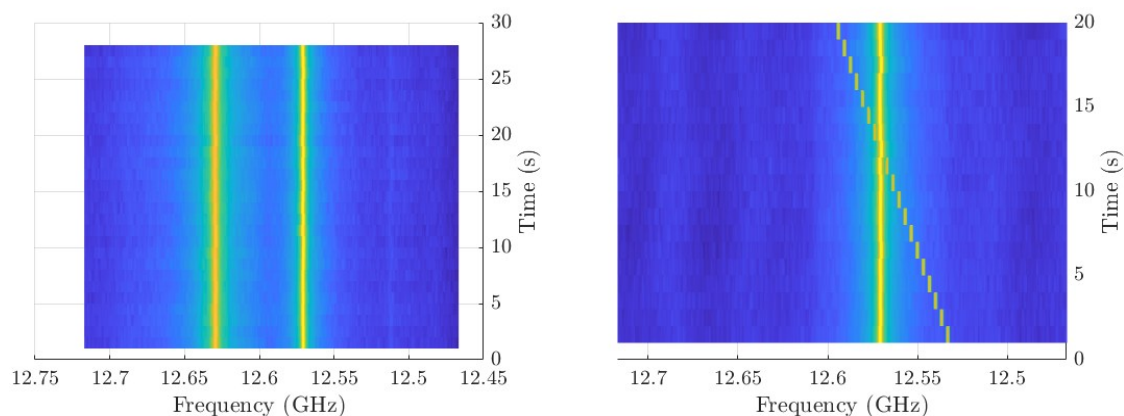


Abbildung 13: Messung mit dem elektrischen Spektrumanalysator. Links beide 200- μm -Laser im Freilauf ohne RF Modulation am Absorber. Rechts Laser 2 wird im Freilauf betrieben und Laser 1 wird mittels RF Modulation über Laser 2 verstimmt.

Der entwickelte Kompressor basiert auf einem optischen Gitter, welches speziell für die Kompensation der chromatischen Dispersion konzipiert wurde. Der Aufbau umfasst hochreflektive Gitter und Spiegel, wodurch eine Minimierung von Verlusten ermöglicht wird. Simulationen zufolge könnte die Kompression der Pulse zu einer Verkürzung der Pulse auf Werte unter 1 ps führen, was für die Verwendung der Laser in THz-Systemen von essentieller Bedeutung ist.

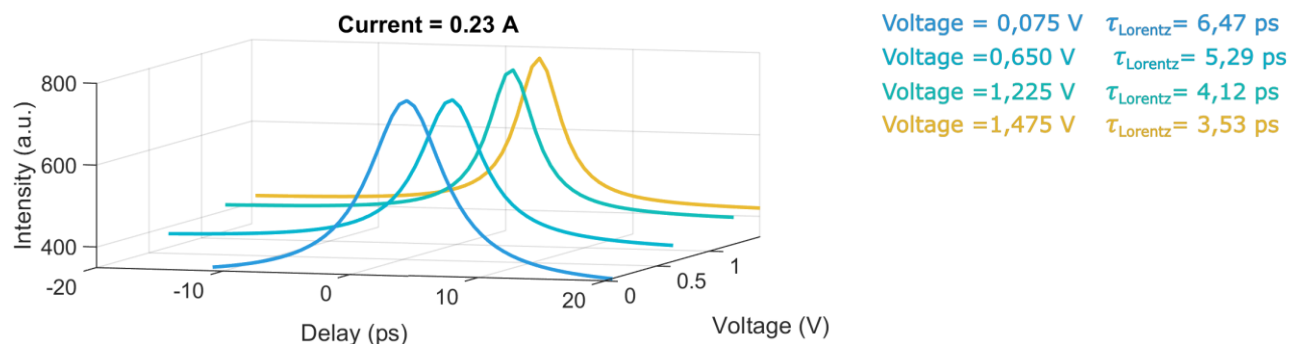


Abbildung 14: 3dB-Bandbreiten und ein Spektrum von einem 200 μm Laser bei einer Temperatur von 18°C.

Der Aufbau des THz-ASOPS-Systems wurde bereits abgeschlossen, jedoch zeigt sich, dass die aktuell eingesetzten, unkomprimierten Pulse nicht für die Generierung von THz-Strahlung geeignet sind, da deren Pulsdauer über 1 ps liegt und somit die Anforderungen der Antennen nicht erfüllt werden. Der geplante Kompressor wird daher zu einer wesentlichen Verbesserung

der Funktionalität des Systems führen. Damit wird eine Nutzung des THz-ASOPS-Systems für THz-Anwendungen ermöglicht.

Die erzielten Resultate sind von großem Wert für die künftige Optimierung des Gesamtsystems. Um die volle Leistungsfähigkeit der 200- μm -Laser mit einem optimierten Kompressor und einer angepassten THz-Antennenkonfiguration zu demonstrieren, sind weiterführende Arbeiten erforderlich.

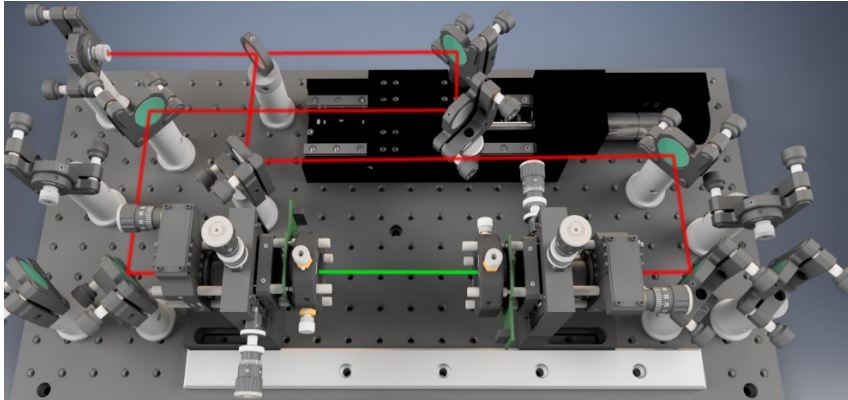


Abbildung 15: Kompaktes TDS/ASOPS System, die Vorjustage erfolgte über den TDS Pfad mit Hilfe eines Ti:Sa Lasers.

Fazit

Im Rahmen des Projektes konnten letztlich erfolgreich monolithisch modengekoppelte Laserdiodensysteme für asynchrone Sampling-Verfahren in optoelektronischen THz-Systemen entwickelt werden. Von den untersuchten Laserdiodengeometrien erwiesen sich diejenigen mit linearen Gainsegmenten (RWL) und 200 μm langen Absorbern als grundsätzlich geeignet. Sie liefern die erforderliche Ausgangsleistung, können stabil mit variabler Repetitionsfrequenz hybrid modengekoppelt werden, und weisen eine ausreichende spektrale Bandbreite bei allerdings stark geschirpten Pulsen auf. Obwohl die grundlegenden Projektspezifikationen erfüllt wurden, konnte die Systementwicklung bis zum Ende des Förderzeitraums aufgrund der komplexen Abstimmungen nicht abgeschlossen werden, so dass die Fertigstellung in künftigen Arbeiten erst nach dem Förderzeitraum zu erwarten ist.

4 Veröffentlichte Projektergebnisse

s. I