

Abschlussbericht

BMBF-VERBUNDPROJEKT: Mid-IR and near-IR laser source and optics for high-brightness EUV radiation

Akronym: MIRROR

FKZ: 01DR20009A

Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer Institut für Angewandte Physik und Feinmechanik (IOF) und Fraunhofer Institut für Lasertechnik (ILT)

Teilvorhabensbezeichnung:

Teilvorhaben IOF: Performanceskalierung von Ultrakurzpulserverstärkern

Teilvorhaben ILT: Nichtlineare Multi-Pass Zelle zur Pulskompression

Berichtszeitraum: 1.10.2020 – 31.3.2024

Projektleiter

Prof. Dr. Jens Limpert

Fraunhofer Institut für Angewandte Physik und Feinmechanik (IOF)

Albert-Einstein-Str. 7

07745 Jena

Tel.: 03641 947811

Fax: 03641 947802

Email: jens.limpert@iof.fraunhofer.de

Teil II: Eingehende Darstellung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	3
1.1	Vorhaben.....	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
1.2.1	Stand von Wissenschaft und Technik vor dem Projektstart.....	4
1.2.2	Eigene Vorarbeiten zum Projektstart.....	5
1.3	Planung und Aufbau des Vorhabens.....	5
2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse.....	6
2.1	Ergebnisse in den Arbeitspaketen.....	6
2.1.1	Thulium-Ultrakurzpulslasersystem.....	6
2.1.2	Nichtlineare Pulskompression in einer gasgefüllten Multipasszelle.....	8
2.2	Kurzzusammenfassung der Meilensteine.....	10
2.3	Erfolgte Veröffentlichungen.....	10
2.4	Patentanmeldungen.....	10
2.5	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	10
2.6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	10
2.7	Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	11

1 Einführung

1.1 Vorhaben

Laserquellen, die den Spektralbereich vom extrem Ultravioletten (EUV) bis hin zum Bereich weicher Röntgenstrahlung abdecken, haben in den letzten 10 Jahren eine rasante Entwicklung hinter sich. Mithilfe dieser Strahlung konnten bisher unbekannte physikalische, chemische und biologische Phänomene auf atomaren Längen- und Zeitskalen (Angström und Femto/Attosekunden) erforscht werden und eröffnen somit Chancen für die Wissenschaft als auch für die Industrie. Beispielsweise bei der aktinischen Inspektion von lithografischen Masken für die Halbleiterindustrie kann EUV-Strahlung (90 eV) gewinnbringend eingesetzt werden. Strahlung im weichen Röntgenbereich, hier speziell im sog. Wasserfenster (282 eV...533 eV, ein Bereich in dem Wasser weitestgehend transparent ist) eröffnet die Möglichkeit Elemente bzw. Proteine mit charakteristischen Absorptionskanten in wässrigen Lösungen zu untersuchen. Im Bereich der Medizin könnten sogar die kleinsten subzellularen Strukturen, z.B. Membranen, Transportkanäle und Gruppen von Proteinen, aufgelöst werden. Von neuen Messansätzen via lens-less coherent diffraction imaging (CDI), dass die Kohärenz der kurzwelligen Strahlung für höchste räumliche Auflösungen nutzt, werden sowohl industrielle (90 eV) als auch biologische und medizinische (>282 eV ... >530 eV) Anwendungen profitieren.

Bisher kann solche Strahlung ausschließlich mithilfe von Synchrotrons erzeugt werden, da heutige laserbasierte Quellen via high-harmonic generation (HHG) nicht ausreichend Röntgenphotonenstrom erreichen. Ziel des MIRROR Projekts ist es, Synchrotron ähnliche Strahlung durch verbesserte, kompakte HHG-Quellen für Anwendungen zur Verfügung zu stellen. Tatsächlich fällt es den leistungsstärksten HHG-Treiberlasern, die meist bei einer Wellenlänge von 0,8 und um 1 μm arbeiten, schwer, applikationsrelevante Photonenflüsse mit Energien von 90 eV und darüber zu erzeugen. Hingegen skaliert sowohl die höchstmögliche HHG-Photonenenergie als auch die Ausbeute prozessbedingt, nahezu quadratisch mit der Wellenlänge des treibenden Laserfeldes. Daher sind ultraschnelle HHG-Treiberlaser, deren Wellenlänge jenseits des nahinfraroten (NIR) Bereichs liegt, der vielversprechendste Ansatz zur Erzeugung kohärenter Röntgenstrahlung mit hohem Photonenstrom und Photonenenergien innerhalb und jenseits des Wasserfensters.

Ziel des Verbundprojektes MIRROR war ein signifikanter Beitrag zur Bereitstellung von Synchrotron-ähnlicher Strahlung in einem kompakten und kosteneffektiven Format. Das dabei verfolgte Konzept basiert auf der Verwendung von faserbasierten leistungsstarken Treiberlasern mit längerer Wellenlänge, um den Photonenfluss bei hohen Photonenenergien deutlich zu steigern. Im Rahmen des Verbundprojektes MIRROR haben sich die Partner University of Tokyo, die Waseda University sowie Tokai Optical CO. LTD. aus Japan mit den Fraunhofer Instituten IOF und ILT und der Active Fiber Systems GmbH aus Deutschland zusammengeschlossen, um neuartige Optiken und Quellen im nahen und mittleren Infrarot zu entwickeln und diese als Treiber zur Erzeugung von kohärenter EUV-Strahlung einzusetzen.

Dabei fokussierten sich die akademischen Partner in Japan und Deutschland auf die Laserquellen bei >2 μm Wellenlänge. Der japanische Industriepartner entwickelte Optiken, die unerlässlich für das Handling der Hochleistungslaserstrahlung sind, wie zum Beispiel dispersive Spiegel mit geringem Wärmeeintrag aber auch Optiken zur Trennung von IR und EUV-Strahlung. Diese Optiken waren zu Projektstart nicht kommerziell in ausreichender Qualität erhältlich, somit bestimmte die Zusammenarbeit mit der japanischen Seite über den Erfolg des Gesamtprojektes. Der deutsche Industriepartner widmete sich der Entwicklung einer kohärenten Quelle, die hohe Leistungen im EUV bis in den weichen Röntgenbereich hinein bereitstellt. Die japanischen sowie deutschen Forschungsinstitute brauchten dabei ihre Erfahrungen ein und unterstützten diese Entwicklungen tatkräftig.

Auf der deutschen Seite sollten Thulium-dotierte Ultrakurzpulsfaserverstärker in ihrer Performance zu mehreren mJ Pulsenergie bei mehreren 100 W mittlerer Leistung skaliert werden. Eine nichtlineare Pulskompression sollte anschließend die Pulse des Faserlasersystem effizient in den Bereich unterhalb 50 fs verkürzen, wodurch ein idealer HHG-Treiberlaser bereitstehen würde. Die kohärenten Quellen im EUV und Wasserfenster strebten Flusswerte deutlich jenseits des Standes der Technik an.

Im Rahmen der Performanceskalierung von Ultrakurzpulsfaserverstärkern bei 2 μm Treiberwellenlänge (Teilvorhaben IOF), konnten neben der Untersuchung von physikalisch limitierenden Effekten auch Rekordwerte erzielt werden. Diese sind: Extraktion von 203 W

Durchschnittsleistung und 2 mJ Pulsenergie, die kohärente Überlagerung der vier Verstärkerkanäle zu 184 W mittlerer Leistung mit einer Effizienz von 90.7% und eine komprimierte, mittlere Ausgangsleistung von 167 W und 1.66 mJ Pulsenergie mit einer Pulsdauer von 85 fs [T9]. Somit konnte der Grundstein für die Festlegung von Anforderung an Hochleistungsoptiken, in enger Zusammenarbeit mit dem japanischen Projektpartner (TOKAI Optical) und dem Fraunhofer ILT gelegt werden. Nachfolgend wurden erfolgreich dielektrische Hochleistungsoptiken entwickelt, hergestellt und getestet. Im Teilvorhaben des ILT konnte dadurch eine nichtlineare Multi-Pass Zelle zur Pulskompression bei 2 μm Wellenlänge demonstriert werden. Die Ausgangsparameter stellen auch hier Rekordwerte für diese Art Pulskompression dar: Ausgangsdurchschnittsleistung von 163 W mit 1.62 mJ Pulsenergie und einer Pulsdauer unterhalb von 20 fs mit einer Gesamttransmission von 96% [P24]. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Die bis hierhin erfolgreich, im Verbund, demonstrierten Systeme stellen für das abschließende Teilvorhaben der Active Fiber Systems GmbH (HHG bis in das Wasserfenster) eine ideale Treiberplattform dar. Identifiziert wurden bisher zwei, effiziente HHG-Arbeitspunkte mit folgenden Ausgangsparametern: 310 eV mit einem erzeugten Photonenfluss von 2×10^6 ph/s/1%bw und 410 eV mit einem erzeugten Photonenfluss von 4×10^6 ph/s/1%bw. Dies entspricht einem applikationsrelevanten Photonenfluss im Bereich des Standes der Technik mit vielversprechendem Skalierungspotential.

Die entwickelten innovativen und leistungsstarken Ultrakurzpulslaser bei 2 μm Wellenlängen sowie die HHG-Quellen besitzen das Potential technologisch neue Akzente zu setzen und signifikante Marktanteile auf dem wissenschaftlichen aber auch industriellen Markt zu erringen. Die Industriepartner im Verbundprojekt sehen daher vielversprechende Verwertungsmöglichkeiten in diesen wachsenden Märkten. Durch die im Rahmen des Projektes gewonnene Verbindung nach Japan eröffnet sich potenziell ein besserer Zugang zum japanischen bzw. asiatischen Markt.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

1.2.1 Stand von Wissenschaft und Technik vor dem Projektstart

2 μm UKP-Lasersysteme:

Bislang wurden leistungsstarke UKP-Strahlquellen im Bereich um 2 μm vornehmlich durch optisch-parametrische Prozesse (DFG, OPA, OPO, OPCPA) von Ti-Sa-, Yb- oder Er-basierten Systemen realisiert ([T1],[T2]). Während hiermit erste vielversprechende Experimente und Anwendungen aufgezeigt werden konnten [T3], kann eine direkte Verstärkung mittels Tm-dotierten Fasern oder Tm/Ho-dotierten Kristallen die Systemkomplexität reduzieren und gleichzeitig eine höhere Effizienz sowie beugungsbegrenzte Strahlqualität von Strahlquellen um 2 μm ermöglichen ([T4],[T5]). Außerdem erscheint eine Skalierung vor allem bezüglich der Durchschnittsleistung oder der Pulsenergie bei einer direkten Verstärkung vielversprechender. Mit faserbasierten Systemen konnten in den letzten Jahren am IOF in Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Physik (IAP) des FAU Jena durch die Entwicklung von Tm-dotierten Großkernfasern zwei neue Rekordwerte realisiert werden. Die Durchschnittsleistung konnte in einem Laboraufbau auf 1060 W [T6] und die Pulsspitzenleistung auf 2 GW skaliert werden [T7]. Die derzeit leistungsstärksten kommerziellen Fasersysteme bei 2 μm werden von der Active Fiber Systems GmbH angeboten und erzielen allerdings nur 100 μJ Pulsenergie. Daher sind die in MIRROR gewonnenen Ergebnisse auch für den Industriepartner auf deutscher Seite von hohem Interesse.

Pulskompression:

Die nichtlineare Kompression ultrakurzer Laserpulse unter Ausnutzung des optischen Kerr-Effekts ist ein weit verbreitetes Verfahren, um größere Bandbreiten bzw. kürzere Pulsdauern zu erreichen, als die Verstärkungsbandbreite eines gegebenen Lasermediums direkt unterstützt. Zunächst werden durch Selbstphasenmodulation in einem χ^3 nichtlinearem Medium neue spektrale Komponenten erzeugt. Anschließend werden diese durch eine optische Anordnung mit negativer Dispersion der Gruppenlaufzeit phasenangepasst, wodurch Pulse mit erheblich kürzerer Dauer als die Eingangspulsdauer erreicht werden können. Bis 2016 wurde ein Großteil der Ergebnisse in diesem Forschungsfeld durch spektrale Verbreiterung in Wellenleitern erreicht - Glasfasern für Eingangs-Spitzenleistungen $P_p < 5$ MW [P1], gasgefüllte Hohlfasern für $P_p > 5$ MW [P2]. Wesentlicher Nachteil ist hier die limitierte Effizienz begrenzt durch Einkopplungs- und Propagationsverluste im Wellenleiter, sowie die Empfindlichkeit gegenüber Poynting und Strahlqualität der Eingangsstrahlung. Das 2016 vom Fraunhofer ILT demonstrierte [P3] und patentierte [P4] Verfahren zur spektralen Verbreiterung in

Multi-Pass-Zellen (MPC) umgeht diese Limitierungen und ist auf große Resonanz im Forschungsfeld ([P5]-[P14]) gestoßen:

Im Wellenlängenbereich um $1\mu\text{m}$ mit Yb-basierten Strahlquellen wurde die Kompression auf Pulsdauern $\sim 30\text{fs}$ und kleiner mit Pulsenergien von wenigen μJ [P7] bis hin zu mJ ([P11], [P13]) demonstriert. Sowohl unter Ausnutzung dielektrischer als auch gasförmiger nichtlinearer Medien wurden Ausgangsleistungen bis ca. 500W erreicht ([P3], [P11]). Kompressionsfaktoren >20 mit Effizienzen $>95\%$ [P11], sowie die Kompression bis zu few-cycle Pulsdauern ([P7], [P13]) wurden demonstriert. Bei 1550nm Wellenlänge wurde die MPC-basierte Kompression von 63fs Pulsen auf 22fs bei einer Ausgangsleistung von $<2\text{W}$ und einer Ausgangs-Pulsenergie von $14\mu\text{J}$ demonstriert, d.h. bei ca. zwei Größenordnungen kleinerer Leistung und Pulsenergie als in diesem Vorhaben angestrebt [P14].

Oberhalb von 1550nm Wellenlänge sind keine Ergebnisse zur MPC-basierten nichtlinearen Pulskompression bekannt. Allerdings wurde hier nichtlineare Pulskompression bei Filamentierung in Gasen [P15], sowie unter Ausnutzung gasgefüllter Hohlfasern ([P17]-[P21]) und Glasfasern [P16] demonstriert. Die größte komprimierte mittlere Leistung liegt bei 43W [P20], die größte Pulsenergie bei $252\mu\text{J}$ [P19], die kürzeste Pulsdauer bei $8,8\text{fs}$ [P21]. Die erreichten mittleren Leistungen und Pulsenergien liegen deutlich unter den im Teilvorhaben „Pulskompression“ angestrebten Parametern.

1.2.2 Eigene Vorarbeiten zum Projektstart

Am IOF bestehen umfangreiche Erfahrungen in der Entwicklung von kontinuierlichen und gepulsten Wellenleiter-Lasern im infraroten Wellenlängenbereich. Das IOF beherbergt eine der renommiertesten Arbeitsgruppen auf dem Gebiet der Faserlaser weltweit.

Im relevanten Bereich der Kurzpulslaser konnten z.B. ultrakurze Laserpulse mit einer mittleren Leistung von $>10\text{ kW}$ und Pulsenergien von einigen Millijoule demonstriert werden. Diese Kenndaten beruhen auf Arbeiten zu neuartigen Faserdesigns (z.B. *rod-type large pitch* Fasern) und Skalierungskonzepten (z.B. kohärentes Kombinieren ultrakurzer Laserpulse) am assoziierten Institut für Angewandte Physik. Es bestehen fundierte Kenntnisse zur Verstärkercharakteristik und begrenzenden nichtlinearen Effekten in Seltenerd-dotierten Fasern.

Seit ca. 5 Jahren wird sich am IOF auch mit der Thematik „Faserverstärker bei $2\mu\text{m}$ Wellenlänge“ beschäftigt. Erste Erfolge sind im Bereich der gütegeschalteten Faserlaser vorzuzeigen, Nanosekundenpulse mit $>2\text{mJ}$ Pulsenergie konnten erzeugt werden [T8]. Darauf aufbauend wurden Ultrakurzpulslasersysteme erforscht. Einerseits wurden modengekoppelte $2\mu\text{m}$ Faserlaser aufgebaut und grundlegend untersucht, andererseits Verstärkersysteme, die bereits Femtosekundenpulse mit Pulsenergien $>100\mu\text{J}$ [T7] und mittleren Leistungen von $>100\text{ W}$ [T6] emittierten.

Das Fraunhofer ILT verfügt über weitreichende Erfahrung bei der Entwicklung von Yb-basierten Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern im Wellenlängenbereich um $1\mu\text{m}$ [P21] sowie bei der Entwicklung Tm- und Ho-basierter Hochleistungs-Strahlquellen um $2\mu\text{m}$ mit Pulsdauern bis in den ns-Bereich **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Die nichtlineare Pulskompression in Multi-Pass Zellen wurde vom Fraunhofer ILT erstmalig experimentell demonstriert [P3] und patentiert [P4]. Das Verfahren wurde am ILT sowohl mit dielektrischen, als auch mit gasförmigen nichtlinearen Medien bei mittleren Leistungen $\sim 500\text{ W}$ und Pulsenergien von wenigen μJ bis zu 1 mJ erprobt ([P3],[P5],[P6],[P11]). In beiden Fällen wurden Effizienzen $>90\%$ und Ausgangs-Strahlqualitäten $M^2 < 1,2$ erreicht ([P3],[P11]). Die kürzeste am Fraunhofer ILT demonstrierte komprimierte Pulsdauer ist 30 fs bei einem Kompressionsfaktor von ca. 20 [P11].

1.3 Planung und Aufbau des Vorhabens

Um Lasersysteme basierend auf den verfolgten Ansätzen Thulium-dotierter UKP-Verstärker und nichtlineare Pulskompression in einer Multipasszelle erfolgreich zu realisieren, war der Aufbau physikalischen Verständnis sowie die Entwicklung von verschiedensten Komponenten erforderlich.

Dies bedingte die Aufteilung des Vorhabens in folgende Arbeitspakete für das Fraunhofer IOF und das Fraunhofer ILT:

AP1.1 Design einer kompakten Anordnung zur Pulsstreckung und -kompression (CPA)

AP1.2 Untersuchung des Einflusses der Nichtlinearität bei der Erzeugung hoher Pulsenergie

- AP1.3 Untersuchung thermischer Effekte der Strahlführungsoptiken
- AP1.4 Aufbau eines Thulium-CPA-Faserlasersystems mit hoher mittlerer Leistung und hoher Pulsenergie
- AP2.1 Simulation und Auslegung des Pulskompressions-Moduls
- AP2.2 Technische Umsetzung und Beschaffung
- AP2.3. Transport des Pulskompressionsmodul zum Projektpartner Fraunhofer IOF und Inbetriebnahme dort
- AP2.4. Charakterisierung des Pulskompressionsmoduls

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

2.1 Ergebnisse in den Arbeitspaketen

Die Arbeiten am IOF und ILT teilten sich in insgesamt 8 Arbeitspakete. Im Folgenden werden wichtigsten Ergebnisse vorgestellt.

2.1.1 Thulium-Ultrakurzpulslasersystem

Der Aufbau von vier Thulium-dotierten Hauptverstärkerkanälen, einschließlich Strahlauftellung und -kombination, wurde erfolgreich abgeschlossen. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau des 4-Kanal Hochleistungslasersystems. Im Rahmen dieses Projekts wurde die Untersuchung der limitierenden Effekte bei der Skalierung der Pulsenergie und der Durchschnittsleistung eines Einzelkanals durchgeführt. Dabei wurden Modulationsinstabilitäten als limitierender Faktor der Einzelkanalperformance identifiziert, wobei trotz dieser Limitierung eine mittlere Ausgangsleistung von etwa 50 W und eine Pulsenergie von etwa 500 μ J erreicht wurden.

Ein bedeutender Meilenstein #1 wurde erreicht, indem eine Durchschnittsleistung von 203 W und eine Pulsenergie von 2 mJ aus vier Faserverstärkerkanälen bei einer Wellenlänge von 2 μ m extrahiert werden konnte. Darüber hinaus wurde die thermische Last des Systems untersucht und die Kühlung optimiert, um einen stabilen Langzeitbetrieb zu gewährleisten. Ein weiterer wichtiger Schritt war die kohärente Überlagerung der vier Verstärkerkanäle, wodurch eine mittlere Leistung von 184 W mit einer Effizienz von 90,7 % erreicht wurde.

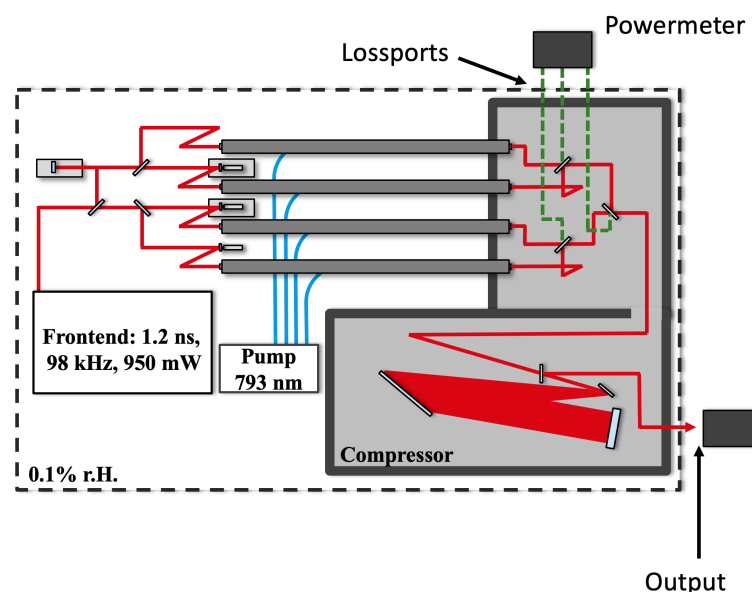


Abbildung 1 Grundsätzlicher Aufbau des Thulium-Ultrakurzpulslasersystems basierend auf kohärenter Kombination von 4 Verstärkerkanälen

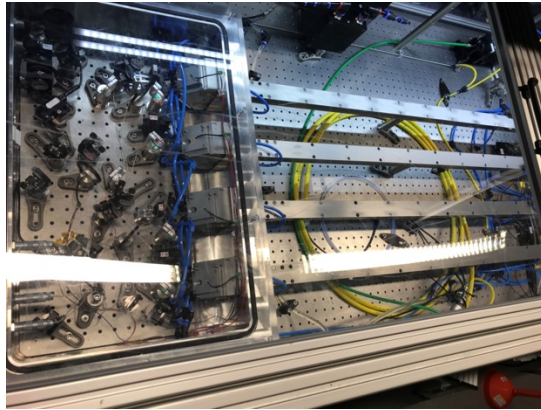


Abbildung 2 Foto der vier Verstärkerkanäle

Die Pulse wurden mittels eines Treacy-Typ Pulskompressors komprimiert, wobei eine Effizienz von 91,8 % erzielt wurde. Dies führte zu einer mittleren Ausgangsleistung von 167 W und einer Pulsenergie von 1,66 mJ bei einer Pulsdauer von 85 fs. Dieser Meilenstein #2 stellt einen weltweiten Rekord dar und bietet eine einzigartige Quelle für die weiteren Arbeiten im Projekt [T9]. Folgende Abbildungen zeigen die wesentlichen zeitlichen, spektralen und räumlichen Charakteristiken der ultrakurzgepulsten Emission bei 2 μm Wellenlänge.

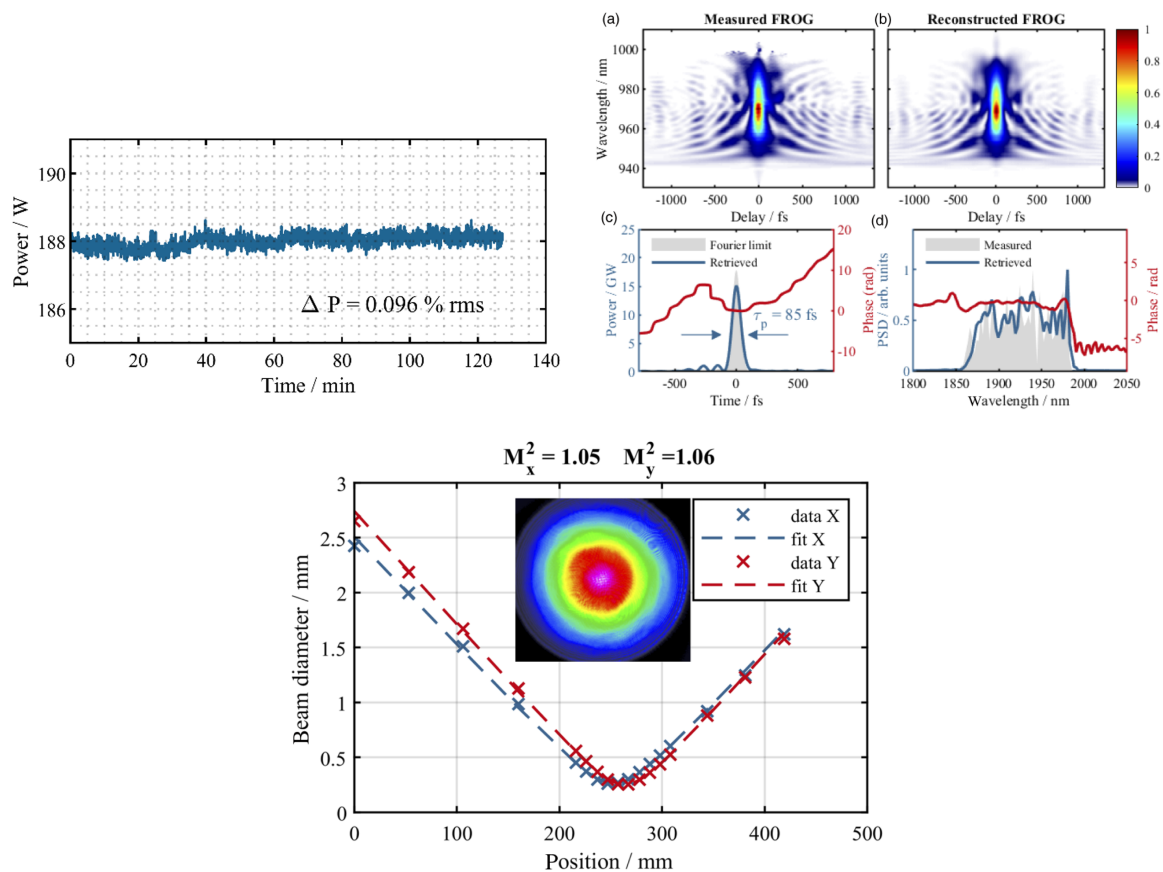


Abbildung 3 Charakterisierung der erzeugten Hochleistungspulse bei 2 μm Wellenlänge

Zusätzlich wurden die Anforderungen an Hochleistungsoptiken in enger Zusammenarbeit mit den japanischen Projektpartnern von TOKAI Optical und dem Fraunhofer ILT festgelegt.

Aufbauend auf den Ergebnissen und erreichten Meilensteinen im Jahr 2021 wurde ein Langzeittest am Hochleistungs-4-Kanal Thulium-Lasersystem erfolgreich abgeschlossen. Dabei wurde eine Leistungsstabilität von besser als 0,1 % über einen Zeitraum von 2 Stunden erreicht.

Vorexperimente zur Pulskompression in Kapillaren wurden durchgeführt, wobei eine Pulsdauer von 10 fs bei einer mittleren Leistung von 132 W und einer Pulsenergie von 1,3 mJ demonstriert wurde. Dies entspricht der weltweit höchsten mittleren Leistung eines Few-Cycle-Lasersystems im SWIR-Spektralbereich. Eine entsprechende Publikation wurde eingereicht, akzeptiert und veröffentlicht [P23]. Im Anschluss liefen intensive Abstimmungen und Vorbereitungen für eine gemeinsame Messkampagne mit dem Fraunhofer ILT zur Pulskompression des beschriebenen Thulium UKP Lasersystems in einer gasgefüllten Multipass-Zelle.

2.1.2 Nichtlineare Pulskompression in einer gasgefüllten Multipasszelle

Der Multipasszellenansatz bietet einige Vorteile gegenüber der spektralen Verbreiterung in einer Hohlkernfaser und lässt sich bezüglich mittlerer Leistung und Pulsenergie besser skalieren. Dieser Ansatz kann somit als Wegbereiter für die künftige XUV-Erzeugung, Spektroskopie und Bildgebung mittels HHG dienen. Im Rahmen dieses Teilprojekts wurden umfassende Simulationen zur nichtlinearen spektralen Verbreiterung bei der genutzten Wellenlänge von 2 μm durchgeführt. Dabei wurde die optimale Anzahl an Strahlumläufen in Kombination mit dem Edelgas Krypton als nichtlineares Medium und dem benötigten Druckbereich von weniger als 1 bar in einer Multipasszellen-Konfiguration erarbeitet.

Die Auslegung der Multipasszelle erfolgte unter Berücksichtigung von Limitierungen durch Ionisation und Spiegelzerstörung sowie der Modenanpassung und zeitlichen Pulskompression mit Quarzglas-Optiken und erfüllte damit dem Meilenstein #3. Ausgehend von den Laserkenndaten des am IOF entwickelten Thulium-Faserlasersystems wurde für die verwendeten Optiken, Gas und Geometrie eine erreichbare Pulsdauer von 32 fs numerisch abgeschätzt, sowie eine Steigerung der Pulsspitzenleistung von mehr als dem Dreifachen.

Darüber hinaus wurde eine kostengünstige thermo-chromische Beobachtungseinheit zur Analyse von 2 μm Strahlung entwickelt. Diese Analyseeinheit erlaubt bereits bei geringen Intensitäten von 4 mW/mm^2 eine örtliche Auflösung von 40 μm .

Die Anforderungen an die benötigten Hochleistungsoptiken wurden in enger Zusammenarbeit mit den japanischen Projektpartnern von TOKAI Optical und dem Fraunhofer IOF festgelegt, und die Lieferung der Optiken erfolgte im ersten Quartal 2022. Die Charakterisierung der Hochleistungsoptiken erfolgte am Fraunhofer ILT, gefolgt vom Aufbau und der Justage der Multipasszelle (MPC).

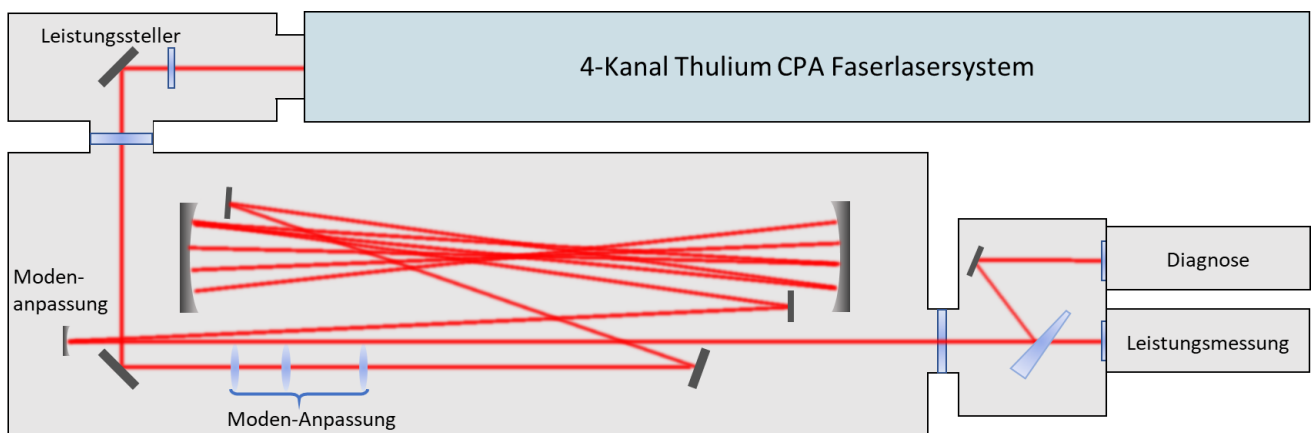


Abbildung 4 Schematischer Aufbau der Pulskompression basierend auf der Multipasszelle

Der erfolgreiche Transport und die Zusammenführung der 2 μm MPC vom Fraunhofer ILT mit dem Thulium-dotierten Ultrakurzpulsfaserverstärker des Fraunhofer IOF markierten die Erfüllung von Meilenstein #4. Die während der ersten Messkampagne durchgeführten Charakterisierungen und Auswertungen ergaben folgende Kenndaten: eine Durchschnittsleistung von 144 W und 1,43 mJ Pulsenergie nach der nichtlinearen spektralen Verbreiterung und anschließender Kompression in Quarzglas bei 2 μm Wellenlänge. Die Gesamttransmission der Zelle wurde mit 96 % bestimmt und die Pulsdauer konnte auf unter 20 fs komprimiert werden, was zu einer Erhöhung der Pulsspitzenleistung

um den Faktor 4,6 führte, womit Meilenstein #5 erfüllt wurde. Zusätzlich wurde eine Stabilitätsmessung über einen Zeitraum von 2 Stunden durchgeführt wobei eine Stabilität von 0.25% rms gemessen wurde. Auch die Strahlqualität wurde mit einer M^2 -Messung beurteilt, wobei sich ein nahezu beugungslimitierter Strahl von $M^2 = 1.1 \times 1.1$ ergeben hat.

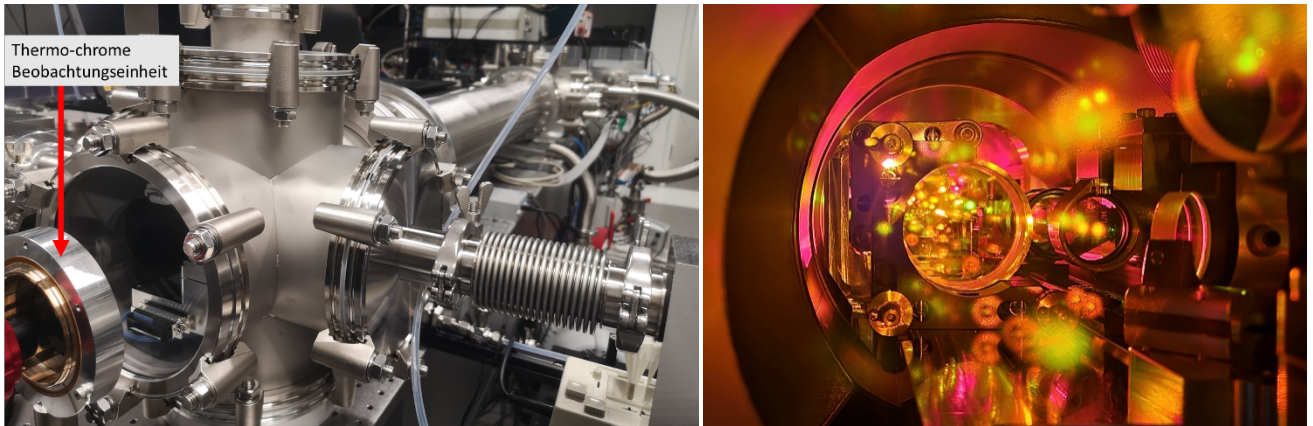


Abbildung 5 Links: Foto der Multipasszelle von außen samt der thermo-chromischen Beobachtungseinheit, Rechts: Foto vom Innenraum während des Betriebes

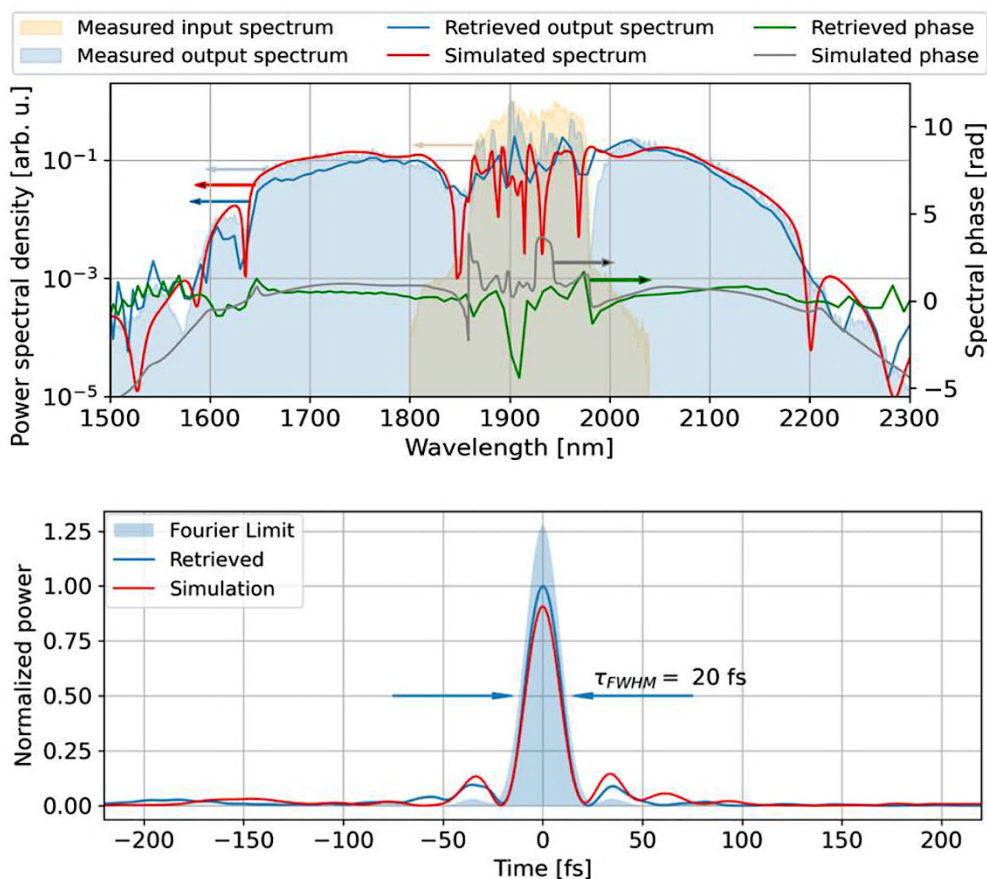


Abbildung 6 Charakterisierung der komprimierten Hochleistungspulse bei 2 µm Wellenlänge

Die erreichten Parameter stellen einen weltweiten Rekordwert dar, und eine entsprechende Publikation wurde getätigt [P24]. Es hat sich gezeigt, dass der Multipasszellenansatz auch im nahen Infrarotbereich einige Vorteile gegenüber der spektralen Verbreiterung in einer Hohlkernfaser bietet und ist in zukünftigen Entwicklungen weiter zu höheren Leistungen und Pulsenergien skalierbar. Im Teilvorhaben „2µm-HHG“, das vom Projektpartner AFS geleitet wurde, aber in enger Kooperation mit den Partner IOF und ILT durchgeführt wurde, wurden schließlich die Kompetenzen aller Partner (Lasertechnologie, Hochleistungsoptiken und EUV-Erzeugung) gebündelt und eine EUV bzw. softXray-Quelle mit einzigartigen Parametern aufgebaut (siehe Abschlussbericht der Active Fiber Systems GmbH).

2.2 Kurzzusammenfassung der Meilensteine

Für die beschriebenen Arbeitspakete IOF „Performance-skalierung von Thulium-dotierten Ultrakurzpulsfaserverstärkern“ und Arbeitspakete ILT „Nichtlineare Multi-Pass Zelle zur Pulskompression bei 2 μ m“ des Verbundvorhabens wurden nachfolgende Meilensteine definiert, welche hier bewertet werden:

- MS#1** (12 Monaten nach Projektstart):
Thulium CPA Faserlasersystem erzeugt Pulsenergien >2mJ bei einer Pulsfolgefrequenz von 100kHz
erfüllt
- MS#2** (18 Monaten nach Projektstart):
Pulskompression zu einer Pulsdauer <200fs, komprimierte Pulsenergie >1.5mJ bei einer Pulsfolgefrequenz von 100kHz
erfüllt
- MS#3** (6 Monate nach Projektstart):
Physikalische und technische Auslegung sowie Simulation der MPC sind abgeschlossen. Beginn der experimentellen Umsetzung.
erfüllt
- MS#4** (18 Monate nach Projektstart):
Vormontage und Tests des Experimentalaufbaus am Fraunhofer ILT sind abgeschlossen. Auslieferung des Aufbaus zur Durchführung gemeinsamer Experimente am Fraunhofer IOF.
erfüllt
- MS#5** (24 Monate nach Projektstart):
Das Pulskompressionsmodul wurde mit dem Faserlasersystem am Fraunhofer IOF in Betrieb genommen und charakterisiert. Das Gesamtsystem ist betriebsbereit für die Erzeugung von EUV-Strahlung.
erfüllt

2.3 Erfolgte Veröffentlichungen

- T. Heuermann et al., "Ultrafast Tm-doped fiber laser system delivering 1.65-mJ, sub-100-fs pulses at a 100-kHz repetition rate," Opt. Lett. 47, 3095-3098 (2022)
- Z. Wang et al., "Nonlinear pulse compression to sub-two-cycle, 1.3 mJ pulses at 1.9 μ m wavelength with 132 W average power," Opt. Lett. 48, 2647-2650 (2023)
- L. Eisenbach et al., "Highly efficient nonlinear compression of mJ pulses at 2 μ m wavelength to 20 fs in a gas-filled multi-pass cell," J. Phys. Photonics 6, 035015 (2024)

2.4 Patentanmeldungen

- keine

2.5 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die dank der bereitgestellten Mittel getätigten Anschaffungen, wie z. B. speziell angefertigte Vakuumkammern für die Realisierung der kohärenten Strahlenkombination, die Kompression und die Multipass-Zelle, waren ein wichtiger Bestandteil des Projekts und haben dessen Erfolg bestimmt.

2.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten in den verschiedenen Arbeitspaketen orientierten sich eng an der ursprünglich im Projektantrag dargelegten Ziele. Wie im obigen Text ausgeführt, konnten in allen Bereichen erhebliche Fortschritte im physikalischen Verständnis und der experimentellen Umsetzung von Femtosekundenlasersystemen bei 2 μ m Wellenlänge und deren nichtlinearen Pulskompression gemacht werden. Dabei wurden auch alle geplanten Meilensteine erreicht und Übergabepunkte eingehalten.

2.7 Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die in diesem Projekt entwickelte Technologie der Thulium Faserlaser sowie der Pulskompression in Multipasszellen stellt eine Möglichkeit dar, wichtige Laserparameter wie die Durchschnittsleistung und die Pulsspitzenleistung in applikationsrelevanten Spektralbereichen weiter zu erhöhen. In der Tat stellen die im Projekt erreichten Kenndaten Rekordwerte im Bereich der Ultrakurzpuls-Lasersysteme bei Wellenlängen um 2 μm dar.

Der Wissenszuwachs im Bereich der Ultrakurzpulslaser-Technologie im Bereich von 2 μm kann auch im wirtschaftlichen Bereich für diverse Laserhersteller interessant sein. Die erfolgreiche weitere Verkürzung der Pulsspitzenleistung und Pulsdauer ist ein Alleinstellungsmerkmal. Dieser Ansatz kann somit als Wegbereiter für Treiberkonzepte zur XUV-Erzeugung mit Anwendungen in der Spektroskopie und Bildgebung angesehen werden.

Das im Rahmen des Projekts Mirror entstandene System ermöglicht wissenschaftliche Applikationen mit weltweit hoher Relevanz und Sichtbarkeit. Fortlaufende Experimente können auf Basis der hier gezeigten Ergebnisse geplant und umgesetzt werden und können darüber hinaus die Grundlage für Folgeprojekte bilden.

Referenzen:

- [T1] H. Fattahi et al., "Third-generation femtosecond technology," *Optica* 1, 45–63 (2014).
- [T2] O. Chalus et al., "Mid-IR short-pulse OPCPA with micro-Joule energy at 100kHz.," *Opt. Express* 17, 3587–3594 (2009).
- [T3] M. C. Chen et al., "Bright, coherent, ultrafast soft x-ray harmonics spanning the water window from a tabletop light source," *Phys. Rev. Lett.* 105, 173901 (2010).
- [T4] S. D. Jackson, "Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser," *Nat. Photonics* 6, 423–431 (2012).
- [T5] C. W. Rudy et al., "Advances in 2- μm Tm-doped mode-locked fiber lasers," *Opt. Fiber Technol.* 20, 642–649 (2014).
- [T6] C. Gaida et al., "Ultrafast thulium fiber laser system emitting more than 1 kW of average power," *Opt. Lett.* 43, 5853–56 (2018).
- [T7] C. Gaida et al., "Thulium-doped fiber chirped-pulse amplification system with 2 GW of peak power," *Opt. Lett.* 41, 4130–33 (2016).
- [T8] F. Stutzki, et al., "2.4 mJ, 33 W Q-switched Tm-doped fiber laser with near diffraction-limited beam quality," *Opt. Lett.* 38, 97-99 (2013).
- [T9] T. Heuermann et al., "Ultrafast Tm-doped fiber laser system delivering 1.65-mJ, sub-100-fs pulses at a 100-kHz repetition rate," *Opt. Lett.* 47, 3095-3098 (2022)

- [P1] C. Jocher et al., "Sub 25 fs pulses from solid-core nonlinear compression stage at 250 W of average power," *Opt. Lett.* 37 (21), 4407 (2012)
- [P2] S. Hädrich et al., "Energetic sub-2-cycle laser with 216 W average power," *Opt. Lett.* 41 (18), 4332 (2016)
- [P3] J. Schulte et al., "Nonlinear pulse compression in a multi-pass cell," *Opt. Lett.* 41, 4511 (2016).
- [P4] A. Vernaleken et al., "Verfahren und Anordnung zur spektralen Verbreiterung von Laserpulsen für die nichtlineare Pulskompression," German patent DE 10 2014 007 159 B4 (2017).
- [P5] J. Weitenberg et al., "Multi-pass-cell-based nonlinear pulse compression to 115 fs at 7.5 μJ pulse energy and 300 W average power," *Opt. Express* 25, 20502 (2017).
- [P6] J. Weitenberg et al., "Nonlinear Pulse Compression to Sub-40 fs at 4.5 μJ Pulse Energy by Multi-Pass-Cell Spectral Broadening," *IEEE J. Quan. Electron.* 53, 8600204 (2017).
- [P7] K. Fritsch et al., "All-solid-state multipass spectral broadening to sub-20 fs," *Opt. Lett.* 43,4643-4646 (2018).
- [P8] M. Ueffing et al., "Nonlinear pulse compression in a gas-filled multipass cell," *Opt. Lett.* 43, 2070 (2018).

- [P9] M. Kaumanns et al., "Multipass spectral broadening of 18 mJ pulses compressible from 1.3 ps to 41 fs," *Opt. Lett.* 43 (23), 5877 (2018)
- [P10] L. Lavenu et al., "Nonlinear pulse compression based on a gas-filled multipass cell," *Opt. Lett.* 43, 2252 (2018).
- [P11] P. Russbueldt et al., "Scalable 30 fs laser source with 530 W average power," *Opt. Lett.* 44 (21), 5222 (2019)
- [P12] T. Saule et al., "High-flux ultrafast extreme-ultraviolet photoemission spectroscopy at 18.4 MHz pulse repetition rate," *Nat. Comm.* 10:458 (2019).
- [P13] P. Balla et al., "Postcompression of picosecond pulses into the few-cycle regime," *Opt. Lett.* 45 (9), 2572 (2020)
- [P14] G. Jargot et al., "Self-compression in a multipass cell," *Opt. Lett.* 43 (22), 5643 (2018)
- [P15] C.P. Hauri et al., "Intense self-compressed, self-phase-stabilized few-cycle pulses at 2 μm from an optical filament," *Opt. Lett.* 32 (7), 868 (2007)
- [P16] C. Gaida et al., "Self-compression in a solid fiber to 24 MW peak power with few-cycle pulses at 2 μm wavelength," *Opt. Lett.* 40 (22), 5160 (2015)
- [P17] M. Gebhardt et al., "Nonlinear compression of an ultrashort-pulse thulium-based fiber laser to sub-70 fs in Kagome photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* 40 (12), 2770 (2015)
- [P18] K. Murari et al., "Kagome-fiber-based pulse compression of mid-infrared picosecond pulses from a Ho: YLF amplifier," *Optica* 3 (8), 816 (2016)
- [P19] M. Gebhardt et al., "High average power nonlinear compression to 4 GW, sub-50 fs pulses at 2 μm wavelength," *Opt. Lett.* 42 (4), 747 (2017)
- [P20] M. Gebhardt et al., "Nonlinear pulse compression to 43 W GW-class few-cycle pulses at 2 μm wavelength," *Opt. Lett.* 42 (20), 4179 (2017)
- [P21] M. Gebhardt et al., "Tm: fiber CPA driven nonlinear pulse compression stage delivering multi-GW, sub-10 fs pulses at 20 W of average power," *Proc. SPIE* 10897, 108971E (2019)
- [P22] P. Russbueldt et al., "Innoslab amplifiers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 21 (1), 3100117 (2015)
- [P23] Z. Wang et al., "Nonlinear pulse compression to sub-two-cycle, 1.3 mJ pulses at 1.9 μm wavelength with 132 W average power," *Opt. Lett.* 48, 2647-2650 (2023)
- [P24] L. Eisenbach et al., "Highly efficient nonlinear compression of mJ pulses at 2 μm wavelength to 20 fs in a gas-filled multi-pass cell," *J. Phys. Photonics* 6, 035015 (2024)