

## Modengekoppelte Scheibenlaser am IFSW

Das Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart arbeitet an SESAM (englisch: Semiconductor Saturable Absorber Mirror) modengekoppelten Scheibenlasern mit unterschiedlichen Yb-dotierten Laserkristallen. Dabei konnten mehrere Rekorde in der mittleren Leistung und Pulsenergie bei Pulsdauern unter 300 fs erzielt werden. In einem Projekt mit der Firma Batop GmbH wurden SESAMs mit erhöhten Zerstörschwellen für den Einsatz im modengekoppelten Scheibenlaser entwickelt und im Laser getestet.

Modengekoppelte Scheibenlaseroszillatoren ermöglichen die effiziente Erzeugung von Licht-Pulsen mit Energien im Bereich von etwa 1  $\mu\text{J}$  bis 80  $\mu\text{J}$  bei Pulsdauern deutlich unter 1 ps und sehr hohen Repetitionsraten von vielen MHz. Daher sind diese Oszillatoren sehr gut geeignete Strahlquellen für vielfältige Anwendungen in der Materialbearbeitung. Zwei Beispiele sind das Modifizieren von Oberflächeneigenschaften, um die Benetzungseigenschaft zu verändern oder das Erzeugen von „Black Silicon“ für Sensoren und Photovoltaikzellen. Weiterhin eignen sich modengekoppelte Scheibenlaser mit etwa 100 W Ausgangsleistung als „Seedlaser“ für Scheibenlaser-Multipassverstärker, um den Ausgangsstrahl direkt auf 1 kW zu verstärken. Somit können aufwändigere Laserarchitekturen mit Zwischenverstärkern vermieden werden.

Die bislang höchsten mittleren Ausgangsleistungen und Pulsenergien wurden mit dem etablierten Kristall

Yb:YAG demonstriert. Jedoch eignet sich Yb:YAG im SESAM-modengekoppelten Betrieb aufgrund der begrenzten spektralen Bandbreite nicht zur Erzeugung von Pulsen mit deutlich unter 500 fs Pulsdauer. Das IFSW hat daher in den letzten fünf Jahren seinen Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung von SESAM-modengekoppelten Scheibenlasern auf den Einsatz und die Untersuchung neuer Ytterbium-dotierter Kristalle gesetzt.

Das IFSW hat Materialien wie Yb:CALGO [1], Yb:SSO [2] und Yb:CaF<sub>2</sub> [3] im modengekoppelten Scheibenlaser und insbesondere bei Pulsdauern von unter 300 fs untersucht. Hierbei konnten sowohl hohe mittlere Leistungen von bis zu 28 W (Yb:CALGO, Yb:SSO) bei moderaten Repetitionsraten (21-27 MHz) als auch hohe Spitzenleistungen von bis zu 5,5 MW (Yb:CaF<sub>2</sub>) bei niedrigeren Repetitionsraten (10 MHz) demonstriert werden. Diese vielversprechenden Ergebnisse bilden eine Grundlage für das Ziel, die Kristalleigenschaften von Yb:CALGO, Yb:SSO und Yb:CaF<sub>2</sub> weiter zu verbessern.

Durch die Zunahme der Pulsenergien im Resonator steigen auch die Anforderungen an die zum Modenkoppeln eingesetzten SESAMs. Die Firma Batop GmbH hat daher im Rahmen des ZIM-Projekts „Langzeitstabile sättigbare Absorberspiegel für den Hochleistungslaserbetrieb - LangSAM“ ihre SESAMs in Kooperation mit dem IFSW weiterentwickelt. Kennzeichnend für diese SESAMs ist die erhöhte Anzahl von Absorberschichten. Dabei wurden drei bis fünf Absorberschichten im SAM räumlich verteilt gewachsen (SAM ist ein Markenname für von der BATOP GmbH hergestellte sättigbare Halbleiterabsorberspiegel). Auf den Halbleiter-SAM wurden zusätzliche dielektrische Schichten aufgebracht, wodurch die Intensität der Pulse im SAM abgeschwächt werden kann. Diese Struktur mit mehreren Absorbern und dielektrischer Beschichtung führt zu einer deutlichen Reduzierung der Intensität und

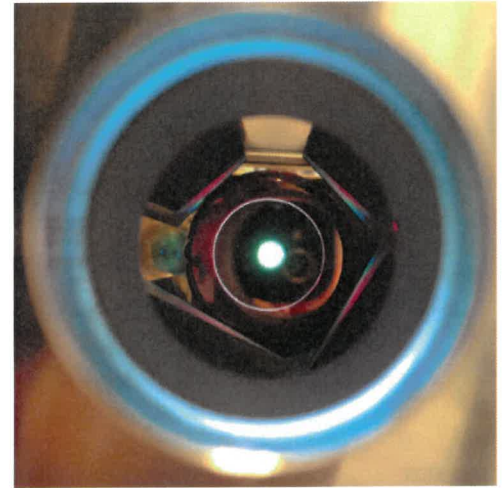


Abbildung 1: Fluoreszierende Yb:CaF<sub>2</sub>-Scheibe im Pumpmodul [3].

der Spitzentemperatur in den Absorbern, wodurch wesentlich höhere Zerstörschwellen zu erwarten sind. Weiterhin eignen sich die so hergestellten SAMs besser für den Einsatz im modengekoppelten Scheibenlaser, da ein „Rollover“ der Sättigung, und somit eine Störung des Modenkoppels, erst bei deutlich höheren Fluenzen auftritt.

Dabei müssen sowohl die resultierende Absorption als auch die Sättigungsfluenz des SAMs auf die im Scheibenlaser notwendigen Werte angepasst werden. Die neuentwickelten SAMs wurden am IFSW im modengekoppelten Betrieb charakterisiert. Hierzu wurde ein auf Yb:YAG basierender Scheibenlaser verwendet. Zum Pumpen wurde ein fasergekoppelter Diodenlaser eingesetzt, welcher bei einer Wellenlänge von etwa 940 nm emittiert. Darüber hinaus wurden Messungen der laserinduzierten Zerstörschwellen am „Institut Fresnel“ in Zusammenarbeit mit Laurent Gallais durchgeführt. Dabei ergab sich eine Steigerung der Zerstörschwelle um einen Faktor von bis 1,7 für SESAMs mit drei Absorbern sowie einem Faktor 2,4 für SAMs mit fünf Absorbern.

Im Mittelpunkt der Untersuchung im modengekoppelten Betrieb stand die Frage, ob der Laser bei vergleichbaren Laserparametern betrieben werden kann, wenn ein „Standard-Referenz-

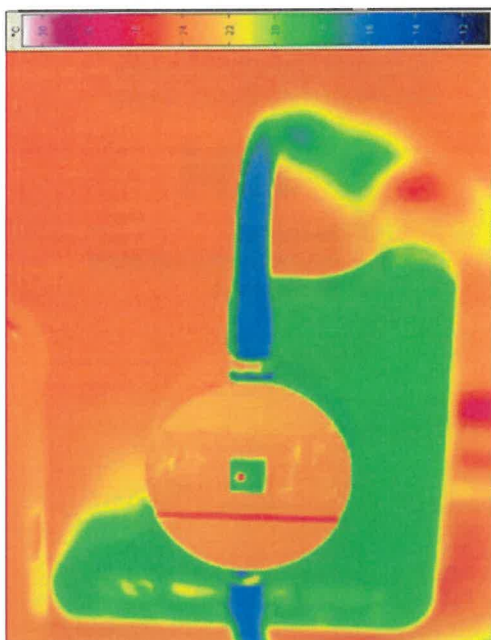


Abbildung 2: Thermokamerabild eines SAMs im Laserbetrieb: Im zeitlichen Mittel erwärmt sich der SAM nur um einige Kelvin, aber in der Zeitphase kurz nach der Reflektion des ps-Pulses sind sehr hohe Temperaturen zu erwarten.

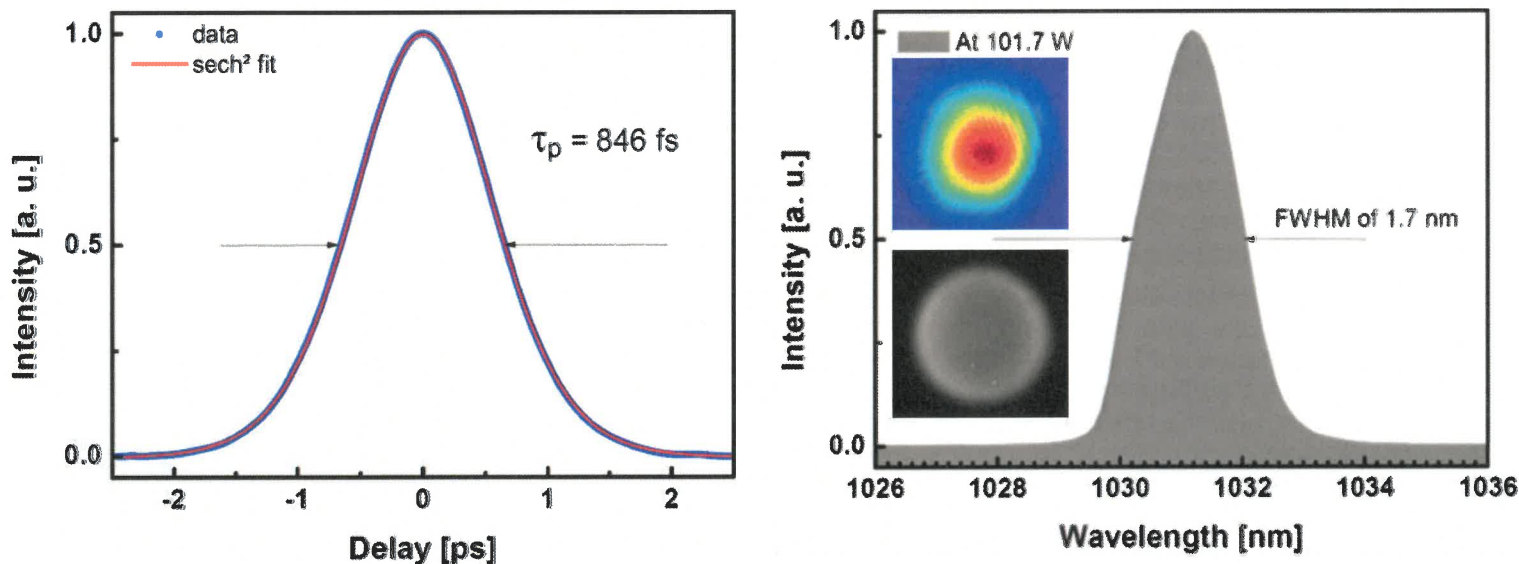


Abbildung 3: Autokorrelation der Pulse bei einer mittleren Leistung von 101,7 W sowie das zugehörige Spektrum. Zusätzlich sind die Intensitätsverteilung im Strahl und ein Kamerabild des Pumpflecks auf der Scheibe abgebildet.

SAM“ mit einem Absorber durch einen SAM mit mehreren Absorbern ersetzt wird. Bei gleichbleibenden Laserparametern ergibt sich entsprechend eine geringere thermische Belastung in den Absorbern. Daher kann eine verlängerte Lebensdauer des SESAMs erwartet werden. Der direkte Austausch eines Referenz-SAMs durch SAMs mit drei Absorberschichten gelang bei mittleren Ausgangsleistungen von etwa 10 W bis 25 W sowie in einem weiteren Aufbau mit angepasstem Resonator bei einer mittleren Ausgangsleistung von 70 W. Dabei wurde der Pumpfleckdurchmesser von 2,3 mm auf 3,5 mm erhöht und der Strahldurchmesser auf dem Absorberspiegel von 0,9 mm auf etwa 1,4 mm vergrößert.

Im Rahmen des Projekts wurde eine mittlere Ausgangsleistung von 102 W erzielt, was ein sehr gutes Ergebnis für Standard Yb:YAG-Oszillatoren in Umgebungsatmosphäre darstellt. Die optische Effizienz betrug etwa 27%. Bei einer Repetitionsrate von 54,6 MHz ergab sich eine Pulsenergie von etwa 1,86  $\mu\text{J}$ . Die Pulsdauer von etwa 850 fs wurde mit einem Autokorrelator gemessen. Folglich betrug die Spitzenleistung der Pulse etwa 1,94 MW. Das gemessene Spektrum hatte eine Halbwertsbreite von etwa 1,7 nm und das Zeit-Bandbreitenprodukt war dementsprechend bei etwa 0,40, was auf einen leichten „Chirp“ der Ausgangspulse hinweist. Weitere Steigerungen der Ausgangsleistung werden in Zukunft möglich sein, wenn SAMs mit weiter verbesserter Homogenität der Krümmung eine wei-

tere Vergrößerung des Strahldurchmessers auf dem SESAM ermöglichen. Auch beim Einsatz der SAMs in modengekoppelten Scheibenlasern mit bspw. Yb:CaF<sub>2</sub> werden weitere Steigerungen der realisierbaren Pulsenergien bei sub-300 fs Pulsdauer erwartet.

Die Aktivitäten am IFSW resultierten in mehreren Rekordergebnissen mit SESAM-modengekoppelten Scheibenlasern bei Pulsdauern unter 300 fs. Weiterhin konnte im Projekt „LangSAM“ erstmals mit kommerziell erhältlichen SESAMs eine Ausgangsleistung von über 100 W aus einem modengekoppelten Scheibenlaseroszillator demonstriert werden. Die im Projekt entwickelten SAMs sind bei der Batop GmbH erhältlich und ermöglichen Steigerungen der erzielbaren Pulsenergien und mittleren Leistungen in modengekoppelten Bulk- und Scheibenlasersystemen.

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des ZIM-Projekts „LangSAM“ gefördert.

#### Referenzen:

- [1] S. Ricaud, A. Jaffres, K. Wentsch, A. Sukanuma, B. Viana, P. Loiseau, B. Weichelt, M. Abdou Ahmed, A. Voss, T. Graf, D. Rytz, C. Hönninger, E. Mottay, P. Georges, and F. Druon, “Femtosecond Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> thin-disk oscillator,” *Opt. Lett.* 37(19), 3984–3986 (2012).  
[2] K. S. Wentsch, L. Zheng, J. Xu, M. Abdou Ahmed, and T. Graf, “Passively mode-locked Yb<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> thin-disk laser,” *Opt. Lett.* 37(22), 4750–4752

(2012).

- [3] B. Dannecker, M. A. Ahmed, and T. Graf, “SESAM-modelocked Yb:CaF<sub>2</sub> thin-disk-laser generating 285 fs pulses with 1.78  $\mu\text{J}$  of pulse energy,” in *Laser Phys. Lett.* 13, 055801 (2016).

#### Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



#### Autoren:

Dipl.-Ing. Benjamin Dannecker  
Institut für Strahlwerkzeuge  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 43  
70569 Stuttgart  
Tel: +49(0)711 685 69749  
benjamin.dannecker@ifsw.uni-stuttgart.de

Dr. Andreas Richter und  
Dipl.-Phys. Rico Hohmuth  
BATOP GmbH  
Stockholmer Straße 14  
07747 Jena  
andreas.richter@batop.de und  
rico.hohmuth@batop.de