



Andreas Isemann (Autor)
**Diodengepumpte Ultrakurzpuls-Laser und
-Verstärkersysteme auf Colquiriite-Basis**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/3301>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Kapitel 1

Einführung

Zuverlässiger – effizienter – direkt diodengepumpt und kompakt – mit diesen Schlagworten lässt sich die Entwicklungsrichtung von Quellen ultrakurzer¹ Laserpulse beschreiben. Größere Zuverlässigkeit wurde mit dem Ersatz von flüssigen Verstärkungsmedien wie z. B. den Farbstoffen, durch kristalline erreicht. Hier ist Titan-Saphir als der erste und zurzeit weitverbreitetste Kristall zur Erzeugung und Verstärkung von Femtosekunden-Pulsen zu nennen. Eine größere Effizienz wurde erreicht, indem die Anregung mittels Argon-Ionen-Laser, der einen äußerst geringen elektrisch-zu-optischen Wirkungsgrad im Promillebereich besitzt, durch *indirektes* Diodenpumpen ersetzt wurde. Laserdioden besitzen einen äußerst hohen elektrisch-zu-optischen Wirkungsgrad von 30–50 %. Indem mit Dioden ein Festkörperlaser gepumpt wird, dessen Ausgangsleistung anschließend frequenzverdoppelt wird, erhält man für den Titan-Saphir-Kristall geeignete Pumpstrahlung. Es sind dabei jedoch drei Konversionsschritte nötig, um aus elektrischer Eingangsleistung verwertbare Pumpphotonen zu erzeugen. Entsprechend gering ist der elektrisch-zu-optische Gesamtwirkungsgrad dieser Anordnung mit einem Wert von typischerweise 5 %. Derartige Lasersysteme sind inzwischen relativ ausgereift und kommerziell erhältlich.

Um die Effizienz weiter zu steigern und den hohen elektrisch-zu-optischen Wirkungsgrad von Laserdioden ausnutzen zu können, muss das aktive Lasermaterial *direkt* durch Dioden angeregt werden. Gleichzeitig entfällt der Platzbedarf des Pumpfestkörperlasers. Diese dritte Stufe der Verbesserung ist Gegenstand der hier vorgestellten Dissertation, die von der Entwicklung neuartiger regenerativer Femtosekunden-Verstärker handelt. Ziel der Untersuchungen war eine effiziente, kompakte, direkt diodengepumpte Strahlquelle für optische Pulse mit Energien im Mikrojoule-Bereich und Pulsdauern von 150–200 fs zum Einsatz z. B. in der Mikromaterialbearbeitung oder in der Ophthalmologie (Augenheilkunde).

¹Als ultrakurz werden hier nur Zeiträume unterhalb einer Pikosekunde im Femtosekundenbereich (1 fs = 10^{-15} s) betrachtet.

Der für die Erzeugung ultrakurzer Pulse etablierte Titan-Saphir-Kristall scheidet aus verschiedenen Gründen für das Erreichen dieses Zieles aus. Zum einen existieren zurzeit keine Hochleistungslaserdioden, die in einem spektralen Bereich emittieren, in welchem Titan-Saphir absorbiert. Es ist auch nicht absehbar, dass in naher Zukunft derartige Dioden existieren werden. Zum anderen besitzt Titan-Saphir mit $3 \mu\text{s}$ eine relativ kurze Lebensdauer des oberen Laserniveaus im Vergleich zu anderen laseraktiven Festkörperkristallen, die Werte von $70 \mu\text{s}$ bis hin zu einer Millisekunde aufweisen. Die kurze Lebensdauer des oberen Laserniveaus erschwert das Anregen mit kontinuierlich emittierenden Pumpquellen insbesondere für den Verstärkerbetrieb, da die aus der Pumpquelle im Kristall gespeicherte Energie mit der Lebensdauer skaliert. Eine effiziente Anregung von Titan-Saphir-Verstärkern mit Repetitionsraten im Kilohertzbereich wird folglich nur durch gepulste Quellen erreicht.

Die Familie der Cr^{3+} -dotierten Colquiriite²-Kristalle wird den Anforderungen nach geeigneten Absorptions- und Emissionsbanden für einerseits direkte Anregung durch Laserdioden und andererseits breitbandige Verstärkung zur Erzeugung ultrakurzer Laserpulse gerecht. Zudem weisen die Colquiriite eine um einen Faktor 20–60 längere Lebensdauer des oberen Laserniveaus im Vergleich zu Titan-Saphir auf, weshalb sich die Colquiriite gut mit kontinuierlich emittierenden Quellen anregen lassen. Insbesondere Cr:LiSAF (LiSrAlF_6), Cr:LiSGAF (LiSrGaF_6) und Cr:LiCAF (LiCaAlF_6) stehen inzwischen in guter optischer Qualität zur Verfügung. Die Kristalle absorbieren im roten Spektralbereich von 600–700 nm, für den Hochleistungslaserdioden auf InGaAlP-Basis existieren. Die Emission der Colquiriite liegt im nahen Infrarotbereich je nach Kristall bei 850 nm, 840 nm bzw. 780 nm mit Bandbreiten von ca. 200 nm. Von den bislang bekannten, direkt mit Laserdioden anregbaren Kristallen besitzen die Colquiriite die breitbandigsten und homogensten Emissionsspektren.

Dem thermischen Management kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Die Lebensdauer des oberen Laserniveaus ist temperaturabhängig (thermisches Quenching) bei einer um ca. einen Faktor 15 schlechteren Wärmeleitung im Vergleich zu Titan-Saphir (bei Raumtemperatur). Bei kontinuierlicher Anregung des Kristalls ist die gespeicherte Energie proportional der Lebensdauer. Je geringer die gespeicherte Menge der Pumpenergie ist, desto kleiner ist die erreichbare Pulsenergie aus dem Verstärker. Die Temperatur, bei der die Lebensdauer im Vergleich zum Wert bei Raumtemperatur auf die Hälfte gesunken ist, liegt mit 69°C bzw. 81°C für Cr:LiSAF bzw. Cr:LiSGAF bei recht niedrigen Werten. Um die Kristalltemperatur trotz hoher Anregungsdichten niedrig zu halten, wurde eine neues Design der Anregung untersucht. Jene Geometrie ist ebenfalls gut zur Anregung des Cr:LiCAF-Kristalls geeignet. Dieser besitzt jedoch mit 255°C eine wesentlich höhere Quenching Temperatur.

Bei der regenerativen Verstärkung ultrakurzer Pulse wird zur Reduzierung der Spitzenleistung

²Der Name Colquiriite stammt von der bolivianischen Stadt Colquiri, in der die ersten LiCAF-Kristalle in einer Zinnmine entdeckt wurden [Fle81].

die CPA-Technik (Chirped Pulse Amplification) angewandt. Hierbei wird der zu verstärkende Puls zunächst durch ein dispersives Element reversibel zeitlich gestreckt und somit in der Spitzenintensität reduziert, um empfindliche Elemente im Resonator nicht zu zerstören. Nach der Verstärkung wird der Puls anschließend wieder durch ein weiteres, dispersives Element komprimiert und so wieder zeitlich verkürzt, wodurch die Spitzenintensität entsprechend steigt. Standardmäßig werden Dispersionsgitter hierfür verwendet, deren Anordnung jedoch platzraubend ist. Für den regenerativen Cr:LiCAF-Verstärker konnte hier ein neues kompaktes Konzept zum Strecken der Pulse demonstriert werden.

Mit der Wahl der Lasermaterialien und dem Design der Anregung wird in dieser Arbeit die Realisierung eines effizienten Ultrakurzpuls-Lasersystems demonstriert.

Die Gliederung ist wie folgt:

In Kapitel zwei wird zunächst eine Übersicht zu den vielfältigen Anwendungsfeldern von ultrakurzen Pulsen gegeben. Anschließend wird ein kurzer Abriss verschiedener Methoden zur Verkürzung der Pulsdauer gegeben. Weiterhin werden vorhergehende sowie aktuelle Lasersysteme zur Erzeugung und Nachverstärkung ultrakurzer Pulse angesprochen und prinzipiell verfügbare, direkt diodenpumpbare Kristalle in ihrer Eignung zur Erzeugung ultrakurzer Pulse verglichen.

Im dritten Kapitel werden die Eigenschaften der Colquiriite als laseraktive Kristalle vorgestellt und Ergebnisse von Experimente im Dauerstrich-Betrieb (cw-Betrieb) insbesondere zum thermischen Quenching beschrieben.

Anschließend wird in Kapitel vier die Erzeugung ultrakurzer Pulse in einem Laseroszillator eingehender erläutert sowie der Cr:LiSAF-Oszillator unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen als Quelle nachzuverstärkender Pulse vorgestellt.

In Kapitel fünf wird zunächst der regenerative Verstärkungsprozess beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse für die verschiedenen Colquiriite-Verstärker jeweils in einem Unterkapitel diskutiert und mit der theoretischen Modellierung der Verstärkung verglichen.

Im Anhang sind Grundlagen zur Strahlausbreitung, Resonatorberechnung sowie Methoden zur Lasercharakterisierung beschrieben, soweit sie nicht schon in den einzelnen Kapiteln behandelt worden sind.