

# Verstärker der nächsten Generation

Parametrische Lasersysteme revolutionieren die Ultrakurzpuls-Physik.

Thomas Binhammer, Jan Ahrens, Alexander Pape, Stefan Rausch, Oliver Prochnow und Gregor Klatt

Dr. Thomas Binhammer, Dipl.-Phys. Jan Ahrens, Dipl.-Phys. Alexander Pape, Dr. Stefan Rausch, Dr. Oliver Prochnow und Dr. Gregor Klatt, Laser Quantum GmbH, Hollerithallee 17, 30419 Hannover, www.laserquantum.com

Viele Anwendungen in der Physik, Biologie und Chemie benötigen ultrakurze Pulsdauern mit hohem Photonenfluss und Wiederholraten im MHz-Bereich oder einen weiten Durchstimmbereich. Hierfür bieten sich parametrische Verstärker an. Diese Quellen lassen sich vielfältig einsetzen, sowohl in industriellen Anwendungen als auch in der Grundlagenforschung.

Die Erzeugung von kohärenter XUV- bzw. Hoher Harmonischer Strahlung (High Harmonic Generation) hat sich zu einem der aufregendsten Gebiete der heutigen Laser-Physik entwickelt und ermöglicht es, Wechselwirkungen innerhalb der Materie mit Attosekunden-Zeitauflösung zu untersuchen. Dies liefert erstmals fundamentale Einblicke in die Natur.

Vor allem die Entwicklung von Laseroszillatoren und Verstärkersystemen auf Basis von Titan-Saphir hat den Einsatz von Femtosekundenlasern in Wissenschaft und industriellen Anwendungen revolutioniert. Diese Technologie kann allerdings die Anforderung

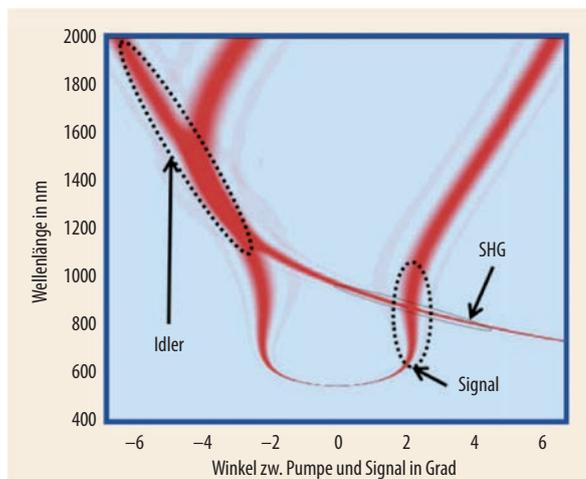


Abb. 1 Durch Nutzung eines BBO-Kristalls als nichtlineares Medium sind eine breitbandige Phasenanpassung und somit Verstärkung über mehrere hundert Nanometer bei einem nichtkollinearen Winkel von 2,5° (Magic Angle) möglich.



Produktdesign des kommerziellen venteon OPCPA der Laser Quantum GmbH

nach einer kompakten anwenderfreundlichen Lichtquelle mit sehr kurzen Pulsen kombiniert mit hoher Durchschnittsleistung und Repetitionsraten von 100 kHz bis in den MHz-Bereich oder nach einem weiten Durchstimmbereich nicht befriedigen. Die Vorteile durch eine höhere Wiederholrate sind enorm: Durch Steigerung von 1 kHz auf z. B. 1 MHz verkürzen sich die Messzeiten von einer Stunde auf 3,6 Sekunden. Ein parametrisches Verstärkerkonzept weist zudem neben einer großen Verstärkungsbandbreite hohes Skalierungspotential auf.

## Parametrisch verstärkt

Ein optisch parametrischer Verstärker (OPCPA, Optical Parametric Chirped Pulse Amplifier) beruht auf der Differenzfrequenz-Erzeugung [1]. Dabei werden zwei Strahlen – Pumpe und Signal – mit den jeweiligen Frequenzen  $\omega_p$  und  $\omega_s$  in einem nichtlinearen Kristall überlagert, sodass der sog. Idler mit der Differenzfrequenz  $\omega_i = \omega_p - \omega_s$  entsteht (Abb. 1). Dieser Prozess ermöglicht es, einen Teil der Energie eines hochenergetischen Pumpimpulses auf einen schwachen Signalpuls zu übertragen. Dies geschieht mit einem sehr hohen Kleinsignal-Gewinn, sodass eine optisch-zu-optische Effizienz von 30 % schon im einfachen Durch-

gang möglich ist. Die Differenzfrequenz wird dabei als Idler-Photon emittiert, sodass der nichtlineare Kristall energetisch nicht beteiligt ist – der Prozess verläuft parametrisch. Daher wird keine Wärme im Kristall deponiert, wodurch sich die Ausgangsleistung dieses Verstärkerprinzips exzellent skalieren lässt. Die Bandbreite und der Wellenlängenbereich sind prinzipiell nur durch die Phasenanpassungsbedingungen gegeben, bei denen Energie- und Impulserhaltung gelten. Durch die Wahl des richtigen Kristalls und die Einführung eines kleinen Winkels zwischen Signal- und Pumpstrahl erweitert sich die Akzeptanzbandbreite erheblich. Dies erlaubt eine extrem breitbandige Verstärkung. Die unterstützte Bandbreite bei Nutzung dieses „Magic Angle“ reicht von 650 bis weit über 1000 nm [2]. Dadurch eignet sich die parametrische Verstärkung in einzigartiger Weise dazu, sogar Laserpulse mit weniger als 6 fs Pulsdauer, die mit kommerziellen Laseroszillatoren erzeugt werden, direkt in den Mikrojoule- oder Millijoule-Bereich zu verstärken, bei Erhaltung der ultrakurzen Pulsdauer [1, 3].

Der speziell in der Attosekundenphysik und XUV-Spektroskopie bestehende Bedarf an hochintensiven, ultrakurzen Laserpulsen mit hoher Wiederholrate, deren Dauer nur wenige Zyklen des elektrischen

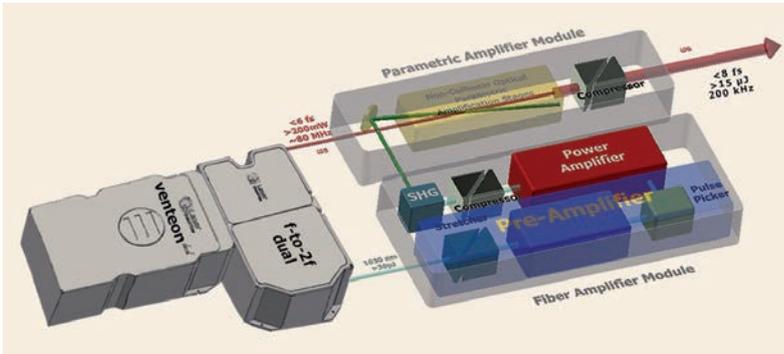


Abb. 2 Aufbau des venteon OPCPA der Laser Quantum GmbH

Träger-Feldes beträgt (Few-cycle Pulse), ließ sich bislang in wissenschaftlichen Laboren nur durch selbstgebaute OPCPA-Systeme befriedigen. Dies grenzt den Nutzerkreis auf Laserexperten ein und beschränkt die Anwendbarkeit der oft komplexen, justage-intensiven Systeme. In den letzten Jahren schritt aber die Kommerzialisierung dieser Technologie voran, sodass OPCPA-Systeme in naher Zukunft zahlreiche Anwendungsfelder erobern dürften.

### Der venteon OPCPA

Als eine der ersten Firmen hat Laser Quantum mit ihrem venteon OPCPA Pionierarbeit geleistet und 2012 den ersten kommerziellen Few-cycle OPCPA auf den Markt gebracht (Abb. 2). Das System nutzt einen ultrabreitbandigen Titan-Saphirlaser als Basis, der mit einem Spektrum von 600 bis 1200 nm extrem kurze Pulse von weniger als 5 fs Dauer ermöglicht und dadurch ein breitbandiges Signal für den parametrischen Verstärker sowie

ausreichend Energie bei 1030 nm für das Seeden eines faserbasierten Verstärkers zur Verfügung stellt, der als Pumpuls für den OPCPA dient. Mit Hilfe zuverlässiger und relativ preiswerter Pumpdioden bei 976 nm erlaubt Ytterbium bei geringem Quantendefekt (d. h. Wärmeeintrag) eine breitbandige Verstärkung. Dadurch kann der Faserverstärker Femtosekundenpulse mit einer Leistung von mehr als 40 W bei hoher Wiederholrate von mehr als 200 kHz liefern. Die generierte Energie wird im parametrischen Verstärker effizient auf das breitbandige Signal übertragen, sodass am Ausgang des OPCPA ultrakurze Pulse mit einer Dauer von weniger als 8 fs und einer Energie von mehr als 15  $\mu\text{J}$  emittiert werden. Das entspricht einer Spitzenleistung im Gigawatt-Bereich bei einer um mehrere Größenordnungen höheren Wiederholrate als bei Titan-Saphir-Verstärkern.

Auch die spektrale Bandbreite ist für viele Anwendungen vor allem in der Femtosekundspektroskopie oder nichtlinearen Bildgebung von großer Bedeutung. Durch die große

Bandbreite des nichtkollinearen parametrischen Verstärkers ist es möglich, fast die gesamte Bandbreite des Signals von 700 bis 1100 nm zu verstärken (Abb. 3a). Zudem sind weitere synchrone Ausgänge bei 520 oder 1040 nm verfügbar. Das System lässt sich sehr einfach durchstimmen und ermöglicht damit die gezielte Anregung bestimmter Spektralbereiche (Abb. 3b).

### Vor dem Durchbruch

Die zunehmende kommerzielle Verfügbarkeit von OPCPA-Systemen ermöglicht den Zugang zu bislang unzugänglichen Strahlparametern. Der Spektralbereich erstreckt sich dank der großen Flexibilität der Technologie vom Sichtbaren bis ins mittlere Infrarot. Darüber hinaus sind Wiederholraten im MHz-Bereich möglich und damit ein hoher Photonenfluss. Momentan liegen Anwendungen meist noch in der Grundlagenforschung. So profitieren besonders Untersuchungen zur nichtlinearen Licht-Materie-Wechselwirkung, XUV-Spektroskopie, kohärente Bildgebung mit Nanometer-Auflösung und dynamische Untersuchungen mit Attosekunden-Zeitauflösung von kommerziell verfügbaren OPCPA-Systemen.

[1] R. Riedel et al., Opt. Lett. **39**, 1422 (2014)  
 [2] G. Cerullo und S. De Silvestri, Review of Scientific Instr. **74**, 1 (2003)  
 [3] C. Manzoni et al., Opt. Lett. **37**, 11 (2012);  
 J. Rothhardt et al., Opt. Express **20**, 10870 (2012);  
 H. Fattahi et al., Optica **1**, 45 (2014)

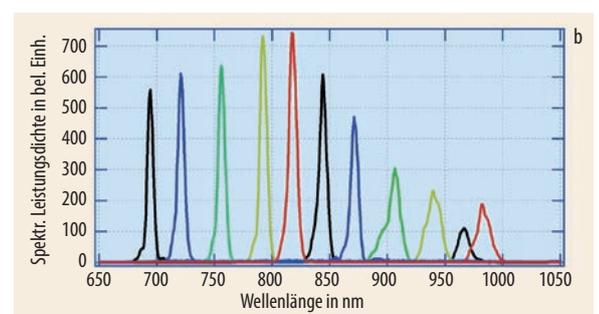
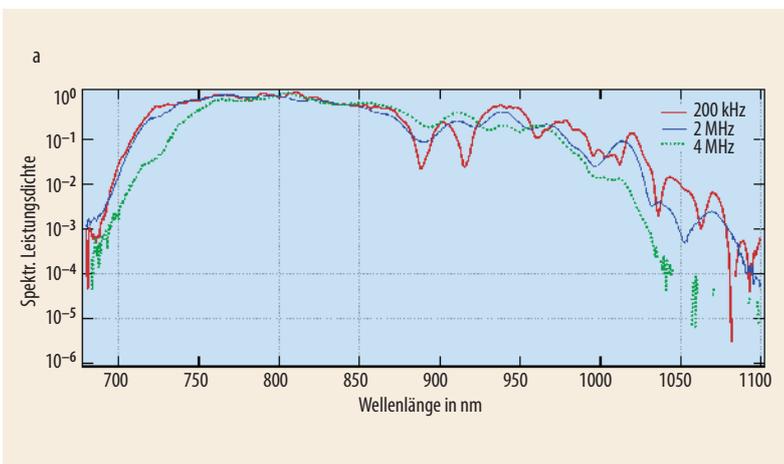


Abb. 3 Der extrem breitbandige Verstärker erlaubt eine spektrale Bandbreite von mehr als 400 nm bei hohen Wiederholraten von 200 kHz bis 4 MHz. Alternativ zur ultrakurzen Pulsdauer von weniger als 8 fs lässt er sich auch in einem durchstimmbaren Modus betreiben.