

Erst kurz, dann stark

Piko- und Femtosekunden Seeder verzeichnen eine ultraschnelle Marktentwicklung.

Femto- und Pikosekunden-Kurzpulslaser erreichen stark zunehmend den industriellen Durchbruch. In Bereichen wie Medizintechnik, Biophotonik, Ophthalmologie und neuerdings insbesondere in der Materialbearbeitung werden heutzutage bereits Kurzpulslaser im größeren Stil eingesetzt bzw. befinden sich in der fortgeschrittenen industriellen Prototypenevaluierung. Dabei ist in vielen Anwendungen das wesentliche pro-Argument für Femto- bzw. Pikosekundenpulse die nicht-thermische Materialbeeinflussung, welche insbesondere feinere und präzisere Bearbeitungskonturen ermöglicht. Das wesentliche Kontra-Argument hingegen ist nach wie vor das Preis-Watt-Verhältnis bzw. die Leistungsbegrenzung für noch schnellere Bearbeitungsprozesse. Auf der Suche nach Kurzpuls-Strahlquellen oberhalb der Durchschnittsleistung von 10 W werden deshalb zurzeit diverse Laserkonzepte evaluiert. Die besten Möglichkeiten bieten MOPA-Konzepte, bei der die Ultrakurzpulser-

zeugung und die Leistungsverstärkung entkoppelt sind.

Vom Physikerlabor zum Endkunden

Um das kommende Potenzial von industriellen Kurzpulslasern besser zu verdeutlichen, lohnt ein kurzer Exkurs in die historische Entwicklung: Die 80er Jahre waren geprägt von rein wissenschaftlichen Ultrakurzpulslasern auf Farbstofflaserbasis. Als externe Pumplaser wurden Gas- bzw. später Festkörperlaser eingesetzt, und alle Lasermodule zusammen benötigten mindestens einen größeren Labortisch. Typische Nutzerzeiten lagen gerne unter 10 %, und Einkaufspreise unter 200 k galten damals als Schnäppchen. Trotzdem wurde in dieser Zeit ein Großteil des derzeitigen Verständnisses über Ultrakurzzeitphysik geprägt. Die 90er Jahre starteten dann mit einer wesentlichen Kurzpuls-Laserrevolution:



den Titan-Saphier-Lasern. In der Anfangsphase waren diese noch Kerr-Lens-modengekoppelt, später dann mit SESAM Modulen ausgestattet. Die nun wesentlich erhöhte Zuverlässigkeit öffnete die Anwendung auch für Nicht-Physiker – beispielsweise Chemiker und Biologen, welche Kurzpulslaser heutzutage in 4-stelligen Stückzahlen beispielsweise in der modernen Mikroskopie einsetzen. Der bis dato vorletzte signifikante Laserschritt um die Jahrtausendwende ersetzte das Lasermedium TiSa durch Kristalle bzw. Gläser, die sich mit Laserdioden pumpen lassen (beispielsweise Nd:Glas, Nd:YVO₄, Yb:KGW). Dadurch konnte der teure Festkörper- oder Gas-Pumplaser durch intern integ-

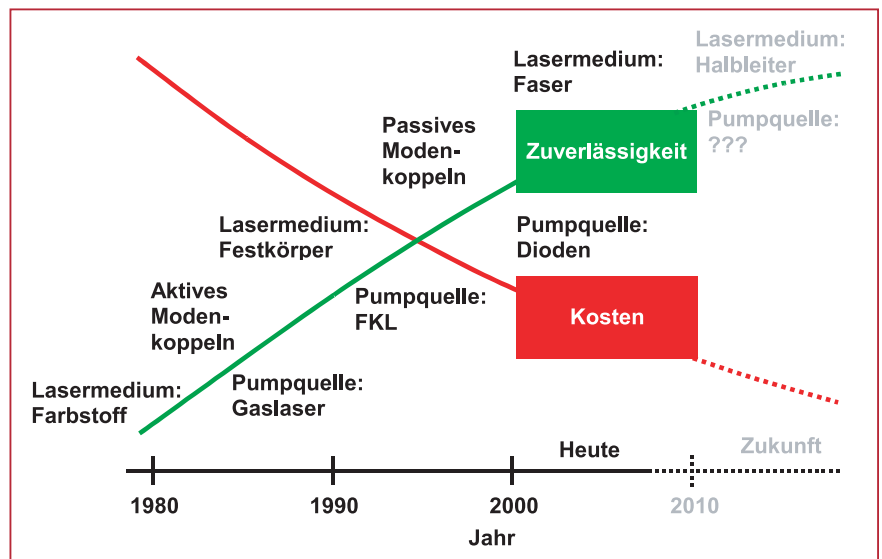
Die Autoren



Dr. Thomas Renner (42) verantwortet den Bereich Vertrieb, Marketing und Produktmanagement bei Toptica. Er hat sowohl auf dem Gebiet der Kurzpulslaserentwicklung als auch bei industriellen Materialbearbeitungslasern jahrelange Erfahrungen gesammelt.



Dr. Reto Häring (36) ist Projektleiter für die kundenspezifische Anpassung von Kurzpulslasern. Er hat im Bereich der Femtosekunden-Laserentwicklung und der optischen Halbleiterbauelementen promoviert und setzt dieses Wissen seit einigen Jahren erfolgreich in industrietaugliche Produkte um.



Historische Entwicklung der Kurzpulstechnologie: Durch Verwendung von bedienerfreundlichen Modenkoppelmechanismen (Kerr-Effekt oder SAM-Spiegel) sowie faserbasierten Laserkonzepten konnte die Zuverlässigkeit auf Industriestandards gesteigert und die Kosten entsprechend gesenkt werden.



rierte Pumpdioden ersetzt werden, so dass erstmals kompakte all-in-one Kurzpuls laser zur Verfügung standen. Hauptanwender waren vor allem anwendungsorientierte Forschungseinrichtungen und die Versuchslabore der Lasermaterialbearbeitung, die im vergangenen Jahrzehnt ganz wesentlich zum Verständnis der Ultrakurzpuls-Materialbearbeitung beigetragen ha-

ben. Für den Einsatz in so genannten »Killer Applications« fehlten hingegen noch ein Hauch mechanischer Stabilität und ein besseres Preis/Watt-Verhältnis.

Faserlaser – industriereife Kurzpuls laser

Der wesentliche Durchbruch zur industriellen Reife erfolgte erst vor wenigen Jahren mit der Umsetzung der Faserlasertechnologie und den damit verbundenen intrinsischen Vorteilen.

Ähnlich wie bei den Multi-kw-cw-Lasern bzw. den neuerdings auch gütegeschalteten Faserlasermodulen können Kurzpuls laser eine Reihe der Errungenschaften der Fasertelekomunikationstechnik technologisch verwerten:

Die Fasermodule bestechen durch eine extrem hohe optische Effizienz und mechanische Einfachheit. Dadurch sind sie kompakt, effizient, stabil, zuverlässig und Platz sparend zu integrieren. Viele

Komponenten können direkt aus der Fasertechnologie, die für die Telekommunikation auf höchste Zuverlässigkeit getrimmt wurden, übernommen werden. Das sind insbesondere die Pumpdioden und Standardkomponenten wie Strahlteiler, Wellenlängenmischer, Isolatoren etc.

Einige Schlüsselkomponenten für Kurzpuls laser sind aber erst in den letzten Jahren technologisch reif geworden. Das sind u. a.:

- Polarisationserhaltende Fasertechnologie: Bei klassischen Glasfasern ändert sich die Polarisation des Lichtes auf seinem Weg. Das ist an und für sich noch kein Problem, aber dieser Effekt ist stark abhängig von Umwelteinflüssen, insbesondere der Temperatur, was die Produktion industrietauglicher Module extrem erschwert. Dieser Effekt macht nicht nur in Kurzpuls lasern Schwierigkeiten, sondern limitiert auch die Bandbreite bei der neuesten (40 GBit/s) Ge-

neration der Datenübertragung. Deshalb wurden Glasfasern entwickelt, die neben dem Lichtleiter auch noch eine Führung für die Polarisation eingebaut haben. Inzwischen sind ziemlich alle Komponenten mit dieser neuen Technologie zu geringem Aufpreis erhältlich.

- **Faser-Bragg-Gitter:** Kurze Pulse erzeugen ein breites Spektrum wegen dem sogenannten Zeit-Bandbreite-Produkt. Um die Pulse auch kurz zu halten, ist es unerlässlich, dass die spektralen Komponenten gleiche Laufzeiten durch den Oszillator haben. Dieser Vorgang wird Dispersionsmanagement genannt und wurde früher mit Freistrahlstrecken mit Prismen- oder Gitterkompressoren realisiert. Inzwischen kann man Gitter direkt mit ultravioletter Belichtung in die Fasern schreiben und selbst komplexe Dispersionsschemen lassen sich hochpräzise vielfach reproduzieren. Auch diese Technologie wird inzwischen in der Telekommunikation verwendet und hat dementsprechende Prüfungen der Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität vollzogen.

- **Sättigbare Absorber-Spiegel:** Vorzugsweise verwendet man passive optische Schalter, um den Laser dazu zu bringen, sein Licht in ultrakurzen Pulsen statt im Dauerstrichbetrieb auszusenden. In der Handhabung am einfachsten und zuverlässigsten haben sich sättigbare Absorber auf Halbleiterbasis etabliert. Diese Bauteile werden je nach Kontext mit vielen klingenden und (weniger klingenden) Namen benannt wie SAM, SESAM, SBR oder A-FPSA. Meist bestehen sie aus einer komplexen, vielschichtigen Halbleiterstruktur die epitaktisch auf ein Substrat aufgewachsen wird. Die Struktur ist ähnliche wie ein VCSEL (vertical cavity surface emitting laser), dem Bauteil das heutzutage in den meisten Computermäusen vorhanden ist. Bei diesen Komponenten liegt derzeit der Schlüssel zur Zuverlässigkeit: »Wer den besten SAM hat, hat den zuverlässigsten Kurzpuls laser.«

Prinzipielle Spektralkomponenten

Der prinzipielle Aufbau eines Kurzpuls-faserlasers besteht aus einer Verstärker-

faser die von echt-Telekom-erprobten Dioden gepumpt wird, einem Modenkoppelmechanismus und meist einem Dispersionsmanagement. Diese drei Elemente genügen oft, können aber z.B. durch spektrale Filter ergänzt und verfeinert werden. Als Verstärkermedien werden meistens mit Ytterbium (ca. 980 - 1080 nm Wellenlänge) oder Erbium (ca. 1530 - 1630 nm Laserwellenlänge) dotierte Quarzglasfasern verwendet. Im Gegensatz zu den klassischen Festkörperlasern haben auf Glasfasern basierte Laser eine wesentlich breitere Verstärkung und somit breitere spektrale Komponenten, was sich in wesentlich kürzere Pulse umsetzen lässt, aber auch erlaubt das Pulsspektrum optimal auf den nachfolgenden Verstärker anzupassen.

Je nach Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Spektralkomponenten können dabei Pulse zwischen einigen hundert Femtosekunden und mehreren Pikosekunden generiert werden.

Die Pulswiederholrate des Oszillators hängt einzig von der Faserlänge des Resonators ab. Ein kürzerer Resonator liefert höhere, ein längerer niedrigere Frequenzen.

Die meisten Oszillatoren werden bei Frequenzen zwischen 20 und 100 MHz betrieben. Für eine wesentlich geringere Wiederholrate, wie sie für die Materialbearbeitung gerne verwendet wird, werden vorzugsweise Pulsepicker eingesetzt. Dadurch wird die Wiederholrate des verstärkten Systems variabel und auf die Anwendung abstimbar.

Typischerweise werden Kurzpuls laser



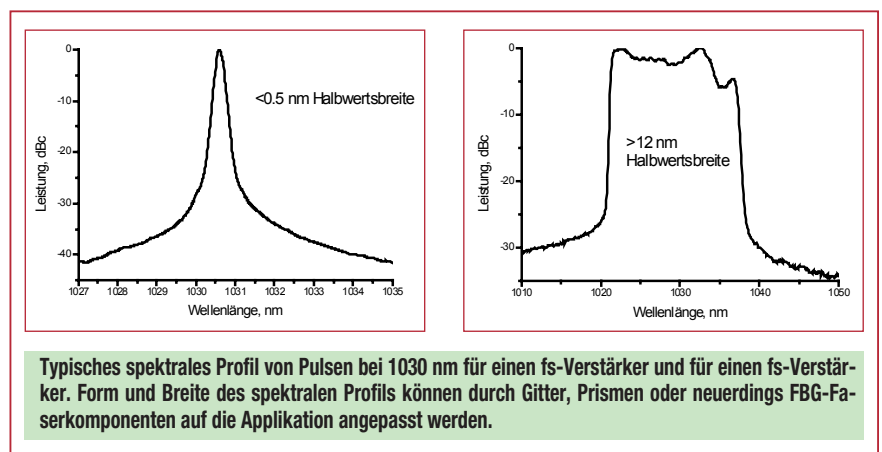
Industrielle Kurzpulsoszillatoren sind kompakte hand-off Einheiten, die – u.a. auch wegen der Faserkopplung - exzellent in MOPA Verstärkerkonzepte integriert werden können.

für die Materialbearbeitung im kHz-Bereich mit hinreichender Pulsenergie und Durchschnittsleistung eingesetzt.

Erst kurz, dann stark

Faserkurzpuls laser sind die ideale Quelle zur Erzeugung kurzer Pulse mit industrieller Standfestigkeit und attraktiver Kostenstruktur. Sowohl Wellenlänge, Pulsdauer und Wiederholrate sind modular innerhalb eines größeren Rahmens auf die jeweilige Anforderung einstellbar, wie die Tabelle »Typische Laserparameter von reinen Kurzpuls-Faserlasern« (mit einer Verstärkerstufe) verdeutlicht.

Die typischen Ausgangsleistungen von reinen Kurzpulsfaseroszillatoren liegen im Bereich von 1 mW. Oft wird noch eine kleine Vorverstärkerstufe eingebaut, die sich sehr effizient mit gleicher Fasertechnologie integrieren lässt. Damit kommt man zu einigen 10 mW bis



strahlquellen

	Yb:Faser	Er:Faser
Wellenlänge	980 .. 1080 nm	1530 .. 1630 nm
Typ. Leistung (ohne Verstärkung)	50 mW	50 mW
Typ. Wiederholfrequenz	15 – 50 MHz	25 – 100 MHz
Typ. Pulsdauer	0.5 – 10 ps	150 – 500 fs
Typ. Spektrale Breite	0.2 – 15 nm	5 nm

Typische Laserparameter von reinen Kurzpuls-Faserlasern (mit einer Verstärkerstufe).

einige 100 mW Durchschnittsleistung. Für höhere Leistungen sind die klassischen Fasern erst mal nicht geeignet wegen der hohen Spitzenleistung und den dadurch entstehenden nicht-linearen Effekten. Aktuelle Forschung ist aber gerade in diesem Feld sehr aktiv, um diese Einschränkungen zu umgehen. LMA-Faserverstärker (Large Mode Areas) und Chirped Pulse Amplification (CPA) sind zwei der vielversprechendsten Techniken, um in den Bereich von bis zu 100 W vorzudringen. Höhere Leistungsstufen können aber auch heute schon durch Adaption von bekannten Verstärkerkonzepten aus der Materialbearbeitung relativ einfach nach dem Master-Oszillator Power-Amplifier (MOPA) Prinzip realisiert werden. Als Verstärkerlaser werden dabei entweder Scheibenlaser oder Stab-laser eingesetzt. Dabei bietet das MOPA-Konzept auf Faser-oszillatorbasis sehr wesentliche fundamentale Vorteile:

- die bisher anfällige Kurzpulserzeugung wird durch die intrinsisch stabile Fasertechnologie garantiert,
- die Leistungsverstärkung und die Pulserzeugung sind entkoppelt, d.h. die kostbar gewonnene Kurzpulsform wird durch den Verstärkungsprozess kaum noch beeinflusst,
- durch Pulspicker zwischen Oszillator und Verstärker kann die Wiederholfrequenz in den kHz Bereich gebracht werden – unter gleichzeitiger Beibehaltung der Gesamtleistung, d.h. der signifikanten Erhöhung der Pulsspitzenleistung.

Ausblick

Die Kombination von Kurzpulsoszillatoren auf moderner Faserbasis und entkoppelter MOPA-Verstärkung ist derzeit die zuverlässigste und leistungsfähigste Methode zur Erzeugung von UltrakurzpulsLasern mit ausreichender Leistung. Durch Verwendung neuartiger Resonatormodule wie sättigbarer Spiegel und FBG-Module ist insbesondere der »hands-off«-Betrieb noch weiter optimiert worden.

Je nach Anforderung kann beispielsweise die Wiederholfrequenz, die Pulsdauer (z.B. wesentlich in der Mikromaterialbearbeitung) oder auch Wellenlänge (z.B. für Ophthalmologie oder Biophotonik wichtig) anwendungsgerecht eingestellt werden.

KENNZIFFER 033

Toptica Photonics

www.toptica.com