

Femtosekunden-Festkörperlaser

T. Brabec, P. F. Curley, F. Krausz, Ch. Spielmann, E. Wintner
Abteilung Quantenelektronik und Lasertechnik, Technische Universität Wien,
1040 Wien

Die passive Modenverkopplungsmethode der solitonähnlichen Pulsformung zur Erzeugung kurzer Laserpulse wird überblicksmäßig erläutert. Mit einem Titan-Saphirlaser wurden basierend auf dieser Methode Pulse von unter 10 fs Dauer — die kürzesten direkt aus einem Laser — erzeugt.

In einem Dauerstrichlaser (cw-Laser) sind die Phasen der Resonatormoden ungeordnet, was im Zeitbereich Fluktuationsspitzen, die um vieles kürzer als die Resonatorumlaufdauer sind, zur Folge hat. Modenverkoppeln bedeutet im Frequenzbereich, daß die Resonatormoden gezwungen werden, bei gleicher Phase zu schwingen. Im Zeitbereich heißt das, daß die stärkste Fluktuation die Energie der schwächeren Fluktuationen aufnimmt und als einziger Puls, der die ganze Energie beinhaltet, überbleibt. Modenverkoppelter Betrieb kann durch aktive oder durch passive Modulation erlangt werden. Da aktive Modenverkoppeltechniken mit Amplitudenmodulatoren oder Frequenzmodulatoren nur einen kleinen Teil der Bandweite der breitbandigen Festkörperlasermaterialien ausnützen können, sind passive Modenverkopplungsmechanismen, die einen größeren Teil der zur Verfügung gestellten Bandbreite ausnützen können, von höchster Bedeutung.

Das herkömmliche Verfahren für passives Modenverkoppeln in Festkörperlasern besteht in der Verwendung eines sättigbaren organischen Farbstoffabsorbers und wurde schon in Farbstofflasern verwendet. Die Relaxationszeit der resonanten Nichtlinearitäten, die im Pikosekundenbereich liegt, hat jedoch die Erzeugung von Femtosekundenpulsen nicht erlaubt. Der erste Versuch, einen schnellen sättigbaren Absorber auf der Basis einer nichtresonanten optischen Nichtlinearität zu verwenden, geht zurück in die frühen 1970er Jahre [1]. Er wurde gefolgt von einer Anzahl verschiedener Methoden, die auf der nichtresonanten Suszeptibilität zweiter Ordnung und dritter Ordnung von nichtlinearen Materialien basieren. Die schwache nichtlineare Antwort dieser Materialien ermöglichte passives Modenverkoppeln jedoch nur in gepulstem Laserbetrieb.

Der Durchbruch in der Technologie der ultrakurzen Pulse aus Festkörperlasern wurde eingeleitet durch die Verwendung eines nichtlinearen Hilfsresonators, der an den Hauptresonator gekoppelt ist. Das nichtlineare Element im Nebenresonator ist eine Glasfaser. Dieses Konzept wurde zum ersten Mal durch Mollenauer und Stolarski Solitonenlaser verwirklicht [2]. Durch die Verkürzung der Solitonen in der Faser im Nebenresonator konnten in einem Farbzentrenlaser sub-100 fs Pulse erzielt werden. Blow and Wood sagten als erste voraus, daß modenverkoppeln auch durch einen externen nichtlinearen Resonator möglich ist, in dem keine Pulsverkürzung stattfindet [3]. Die Subpikosekundenerzeugung beruht auf einer kohärenten Addition des im Hilfsresonator schwach nichtlinear phasenverschobenen Pulses mit dem Puls im Hauptresonator und wurde als additive pulse mode-locking (APM) [4] bezeichnet. Diese quasi sättigbare Absorberwirkung hat eine sehr schnelle Antwortzeit und eine breite Bandweite, da sie auf einer nichtresonanten Kerr-Nichtlinearität beruht.

Der Nachteil von APM ergibt sich aus dem interferometrisch gekoppelten Hilfsresonator, da für eine stabile Pulserzeugung die Länge des externen Resonators an die Länge des Hauptresonators auf eine Bruchteil der Wellenlänge genau angepaßt werden muß. Obwohl elektroni-

sche Rückkoppelungsschleifen die Stabilität verbessern können, wird die Modenverkopplung durch starke Störungen, die nicht mehr ausgeglichen werden können, unterbrochen. Die Stabilität kann durch Verwendung eines Michelson-Interferometers verbessert werden, das eine kürzere Faserlänge erfordert [5]. Selbststabilisierung auf einer langsamen Zeitbasis wurde in APM Lasern beobachtet, die Multimodenfasern verwenden. Ein resonanter sättigbarer Absorber, der die nichtresonante Kerr-Nichtlinearität im externen Resonator ersetzt, hat ebenfalls eine Selbststabilisierung zur Folge, die auf einer Selbstfrequenzanpassung beruht [6]. Änderungen in der Längendifferenz zwischen Haupt und Nebenresonator werden durch eine Verschiebung der Zentrumsfrequenz des Lasers kompensiert. Daher können stabile Pikosekundenpulse ohne aktive Längenstabilisierung erzeugt werden. Diese Technik wird resonantes passives Modenverkoppeln bezeichnet.

Bei APM Lasern wird die zeitabhängige Phasenverschiebung (in Propagationsrichtung des Pulses), die durch eine resonante Kerr Nichtlinearität verursacht wird, für passive Modulation benutzt. Diese Phasenverschiebung hängt jedoch nicht nur von der Zeit sondern auch von den räumlichen Koordinaten ab, die zu einer intensitätsabhängigen Resonatormode führt. In Wechselwirkung mit einer räumlichen Blende ergibt das eine einfache Möglichkeit für einen ultraschnellen optischen Modulator. Spence et al. haben diesen Effekt zum ersten Mal verwendet [7] und Piche war der erste, der erkannt hat, daß Selbstfokussierung für diesen Modenverkopplungsmechanismus verantwortlich ist. Die einfachste Verwirklichung dieser Technik verwendet den nichtlinearen Brechungsindex des Verstärkermediums. Die "weiche" Blende wird durch das im Verstärker gepumpte Volumen realisiert [8]. Dieser Effekt der in allen longitudinal gepumpten Lasern vorhanden ist, kann durch eine harte Blende im Resonator verstärkt werden, wie zuerst von Spinelli et al gezeigt wurde [9]. Modenverkoppeln durch Selbstfokussieren wird als self mode locking oder als Kerr-lens mode locking bezeichnet.

Zum Unterschied zu ihren Farbstoff-Vorgängern brauchen passiv modenverkoppelte Festkörperlaser eine netto negative Dispersion im Resonator um Femtosekundenpulse erzeugen zu können. Damit konnten in den verschiedensten passiv modenverkoppelten Systemen sub-100 fs Pulse erzeugt werden. All diese Systeme können durch eine einfache schematische Resonatoranordnung beschrieben werden, die hier als solitärer Laser bezeichnet wird. Dieses System besteht im einfachsten Fall aus drei Elementen, einer Nichtlinearität, einer negativen Dispersion, und einer passiven Amplitudenmodulation, wobei die Bezeichnung solitär von der solitonähnlichen Wechselwirkung zwischen Nichtlinearität und negativer Dispersion kommt.

Abb. 1 zeigt ein schematisches Diagramm eines solchen solitären Lasers mit seinen Pulsformungseffekten, die theoretisch durch Operatoren repräsentiert werden. $v_n(t)$ ist das elektrische Feld innerhalb des Resonators, wobei n die Anzahl der Umläufe angibt und T den Operator darstellt, der während eines Umlaufs auf den Puls wirkt. Ausgehend von diesem Konzept ist es möglich, durch umfangreiche numerische Berechnungen die Oszillatorparameter so zu optimieren, daß die kürzestmöglichen Laserimpulse erzeugt werden.

Mit dem Titan-Saphirlaser lassen sich die einleitend erläuterten Konzepte optimal verwirklichen. Abb. 2 zeigt die Resonatoranordnung, wie sie an der TU Wien verwendet wurde. Die Pumpquelle ist ein modenverkoppelter Nd:YLF—Laser, dessen Frequenz verdoppelt wurde, sodaß er ungefähr 6 W bei 527 nm in Form von 50 ps Pulsen mit 76 MHz Wiederholfrequenz leistet. Das dabei auftretende synchrone Pumpen wirkt sich auf die passive Impulsformung überhaupt nicht aus, aber es bewirkt ein sofortiges Starten der Modulationsmechanismen.

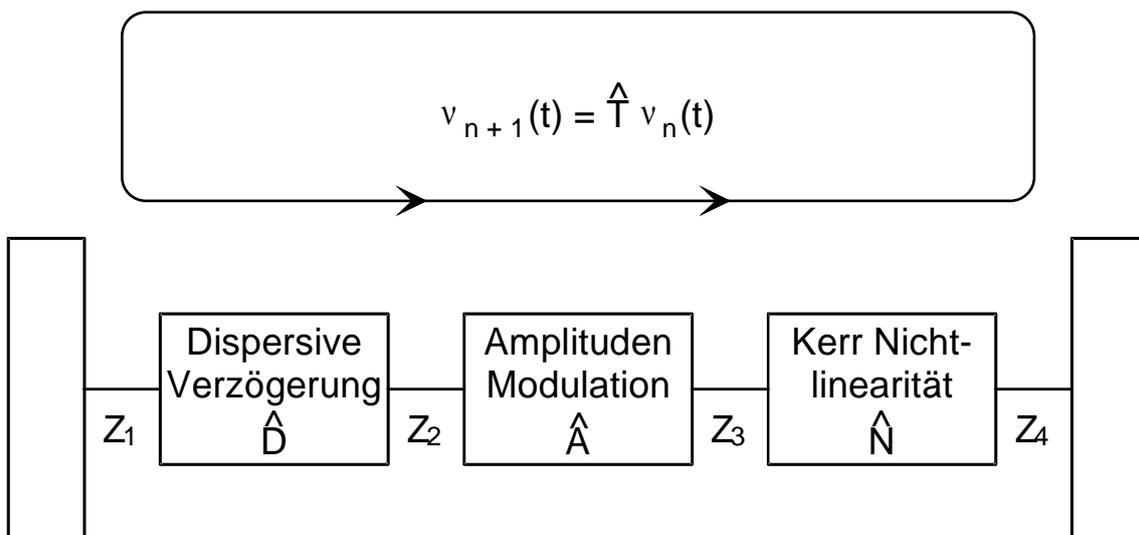


Abb.1: Schematisches Diagramm eines solitären Lasersystems.



Abb. 2: Femtosekunden-Festkörperlaseroszillator.

Das Gain-Medium ist gleichzeitig Kerr-Medium und Blende, da das räumliche Gain Profil als weiche Blende (soft aperture) wirken kann. Zusätzlich kann eine harte Blende in den Resonator nahe dem Endspiegel M4 eingesetzt werden. Da das Gain-Medium beides, PAM (passive Amplitudenmodulation) und SPM (Selbstphasenmodulation) zur Verfügung stellt, braucht zur solitären Pulsformung nur noch eine dispersive Verzögerungsstrecke (mit negativer GDD — Gruppenverzögerungsdispersion) in den Resonator eingesetzt werden.

Da positive Dispersion, die durch das Gain-Medium eingeführt wird und Dispersion dritter Ordnung, die auf das Prismenpaar zurückzuführen ist, die Pulsverkürzungseffizienz limitieren, wurde das Lasersystem in Bezug auf diese beiden Effekte optimiert. Durch die Verwendung eines 4mm Ti:Saphir Stabes und eines Quarzglas-Prismenpaars wurden die positive Dispersion und die Dispersion dritter Ordnung so weit reduziert, daß die bisher kürzesten

Pulse von unter 10 fs Dauer, die direkt aus einem Lasersystem kommen, erzeugt werden konnten [10]. Abb. 3 und 4 zeigen interferometrische Autokorrelation und Spektrum von 11,5 fs langen Pulsen mit einer lasenden Bandbreite von 71 nm. Die kürzesten gemessenen Pulse weisen nur noch 7 Oszillationen der Feldstärke in der interferometrischen Autokorrelationskurve auf, jedoch eine Bandbreite von 110 nm. Da diese Pulse daher nicht bandbreitenlimitiert sind, kann angenommen werden, daß eine geeignete Kompensation der Dispersion höherer Ordnung außerhalb des Resonators die Formung von Pulsen unter 7 fs erlauben würde, ohne daß weitere optische Nichtlinearitäten eingesetzt werden brauchen [10].

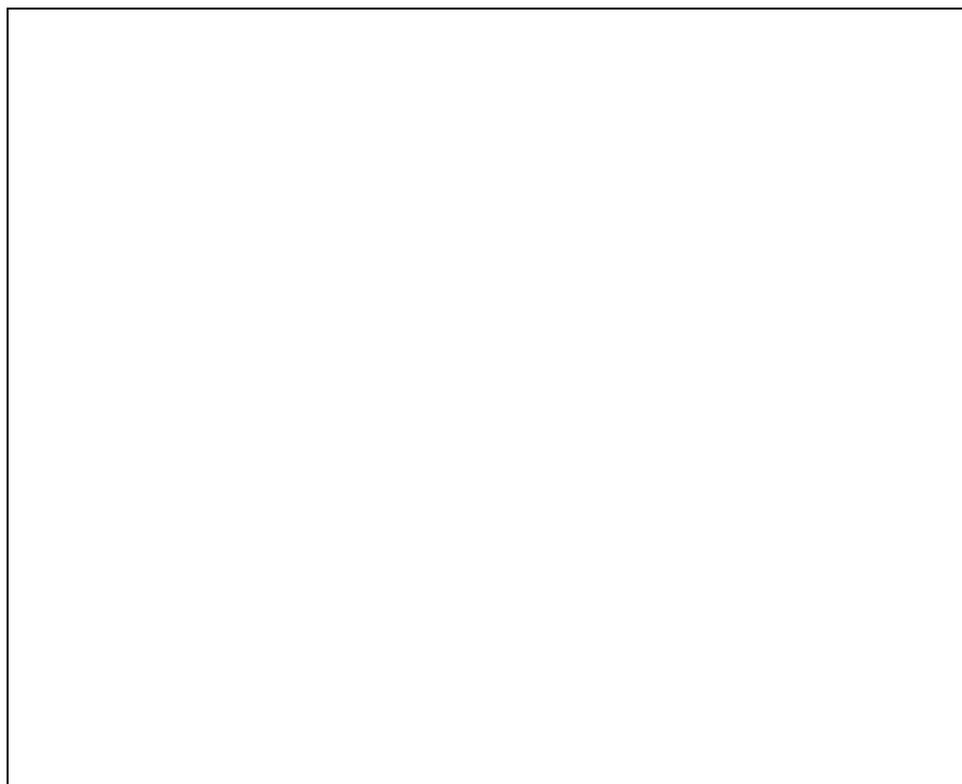


Abb. 3: Interferometrische Autokorrelation eines Pulses mit 11,5 fs Breite.

Literatur

- [1] L. Dahlström, *Opt. Comm.* **5**, 157 (1972)
- [2] F. M. Mitschke and L. F. Mollenauer, *Opt. Lett.* **12**, 407 (1987)
- [3] K. J. Blow and D. Wood, *J. Opt. Soc. Am. B* **5**, 629 (1988)
- [4] J. Mark, L. Y. Liu, K. L. Hall, H. A. Haus and E. P. Ippen, *Opt. Lett.* **14**, 48 (1989)
- [5] Ch. Spielmann, F. Krausz, T. Brabec, E. Wintner and A. J. Schmidt, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 2470 (1991)
- [6] H. A. Haus, U. Keller and W. H. Knox, *J. Opt. Soc. Am. B* **8**, 1252 (1991)
- [7] D. E. Spence, P. N. Kean and W. Sibbet, *Opt. Lett.* **16**, 42 (1991)
- [8] F. Krausz, Ch. Spielmann, T. Brabec, E. Wintner and A. J. Schmidt, *Opt. Lett.* **17**, 200 (1992)

- [9] L. Spinelli, B. Couillaud, N. Goldblatt and D. K. Negus, in Digest of Conference on Lasers and Electro Optics (Optical Society of America, Washington, D. C., 1991), paper CPDP7
- [10] Ch. Spielmann, P. F. Curley, T. Brabec and F. Krausz, eingereicht bei J.Quant. Electronics (1993)



Abb. 4: Spektrum des Pulses von Abb. 3.