

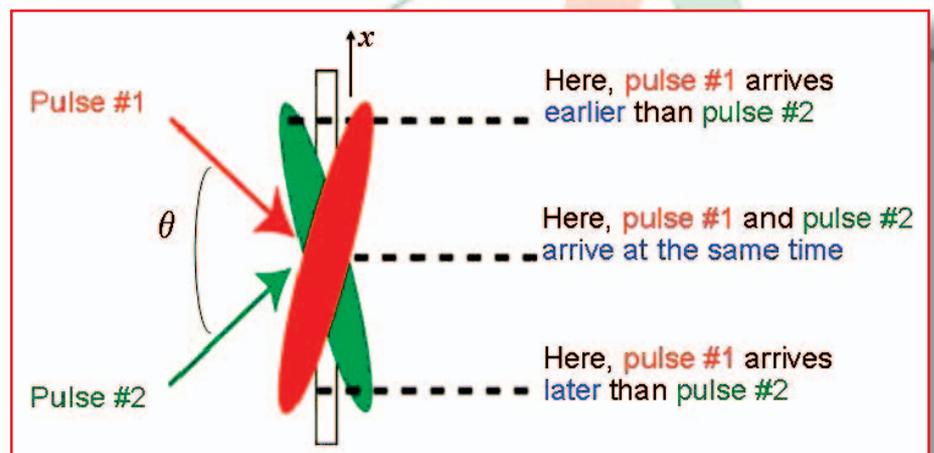
# FROG für extrem kurze und relativ lange Ultrakurzpulse

Selcuk Akturk, Xun Gu, Mark Kimmel, Rick Trebino,  
School of Physics, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA

Immer mehr Anwendungen verwenden ultrakurze Pulse mit Pulslängen von ein paar Femto- bis zu einigen Picosekunden. Bislang war die Messtechnik auf Pulse im Bereich von 100 fs beschränkt, da die kürzeren und längeren Pulse besondere Anforderungen stellen. Für diese Probleme sind nun Lösungen gefunden - teilweise auf unerwartete Weise.

Die Messtechnik für ultrakurze Pulse konzentriert sich auf die Messung von Pulsen im Bereich von 100 fs. Zum Teil, weil 100 fs die derzeit gebräuchlichste Pulslänge ist, aber auch weil das Messen von deutlich kürzeren oder deutlich längeren Pulsen spezielle Ansprüche stellt. Inzwischen sind sehr kurze (ein paar fs) und relativ lange Pulse (einige ps) für eine Vielzahl von Anwendungen in Verwendung, und auch kommerzielle Laser sind für sie verfügbar. Bislang fehlte allerdings die entsprechende praktische und umfassende Pulsdiagnose. Daher wurden jetzt kompakte, günstige und einfach zu bedienende Systeme entwickelt, die diese Pulse messen können. Die Systeme benötigen beinahe keine Justage, charakterisieren aber die Pulse sehr genau, indem sie deren gesamte zeitabhängige Intensität und Phase liefern und die wichtigsten räumlichen und zeitlichen Störungen beschreiben, den räumlichen Chirp und die Neigung der Pulsfront.

Um Lichtpulse zu messen werden sie im allgemeinen zweigeteilt und ein Puls gegenüber dem anderen variabel verzögert. Die Teilpulse kreuzen sich dann in einem Frequenzverdoppelungskristall (SHG-Kristall) und die frequenzverdoppelte Pulsenergie oder das Spektrum wird in Abhängigkeit der Verzögerung gemessen. Die Messung der Energie gegen die Zeit, die Autokorrelation, liefert lediglich einen groben Wert der Pulslänge. Es ist besser, den zeitlichen Verlauf des Spektrums aufzutragen, wodurch man die gesamte Pulsintensität und Phase in Abhängigkeit der Zeit erhält. Diese Technik des frequenz aufgelösten optischen Taktens (frequency-resolved optical gating) nennt sich FROG [1]. Bei allen ultraschnellen Vorgängen stellt die Bandbreite die größte Herausforderung



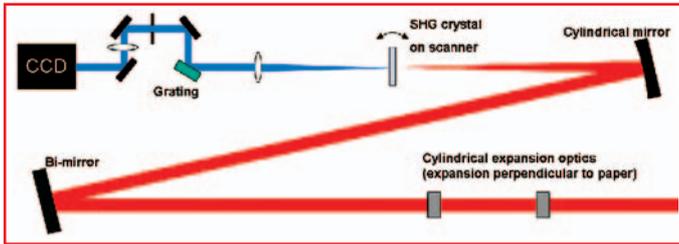
**Bild 1:** Zwei gekreuzte Strahlen ergeben eine lineare Variation der relativen Verzögerung entlang des nichtlinearen Kristalls. Dadurch wird der gemessene Puls länger als der tatsächliche, wenn die Verzögerung zwischen den Pulsen durch Bewegen eines Spiegels gemessen wird. Dieser Effekt kann aber auch genutzt werden, um einen einzelnen Puls zu messen und das geometrische Verschmieren zu verhindern

an die Messtechnik. Die Frequenzverdopplung muss genug Bandbreite haben, um die zweite Harmonische der gesamten Bandbreite des zu messenden Pulses zu erzeugen. Unglücklicherweise benötigen unterschiedliche Wellenlängen unterschiedliche Kristallwinkel im Frequenzverdoppler, während der Puls unter nur einem Winkel eintritt. Daher wird lediglich eine Wellenlänge ideal frequenzverdoppelt, andere nur annähernd oder überhaupt nicht. Da die frequenzverdoppelte Bandbreite umgekehrt proportional zur Kristalllänge ist, bedingen die Bandbreiten-Überlegungen für sehr kurze Pulse extrem dünne nichtlineare Kristalle, etwa 10  $\mu\text{m}$ . Solche Kristalle sind schwer herzustellen und zu handhaben, vor allem hat das

Gerät nur eine geringe Empfindlichkeit, da die Effizienz des Kristalls mit dem Quadrat seiner Länge zunimmt.

Ein weiterer Punkt ist die Gruppengeschwindigkeits-Dispersion (GVD), die Abweichung in der Materialgruppengeschwindigkeit für die einzelnen Wellenlängen innerhalb des Pulses. In jeder Komponente des Systems verbreitert GVD die Pulse und beeinträchtigt so die Messung.

Sind die Strahlen räumlich ausgedehnt und unter einem Winkel gekreuzt, kann die relative Verzögerung zwischen den Pulsen zusätzlich transversal über den Kristall verschieden sein, so dass eine Variation von Verzögerungen detektiert wird (**Bild 1**) [1]. Dieser Effekt heißt „geometrisches Verschmieren“ und bewirkt, dass der Puls



**Bild 2:** Vereinfachter FROG-Aufbau zur Messung von 10fs-Pulsen. Die Besonderheit: Vor dem Kristall wird kein dispersives Element eingesetzt. Die Spektrometerplattform bietet ausreichend Auflösung für breitbandige Pulse

als zu lang gemessen wird. Für sehr kurze Pulse ist dieser Effekt deutlich stärker, und er ist besonders nachteilig, wenn man einen breiten Strahl und einen großen Strahl-Kreuzwinkel hat – beides Voraussetzungen für praktische, leicht auszurichtende Systeme.

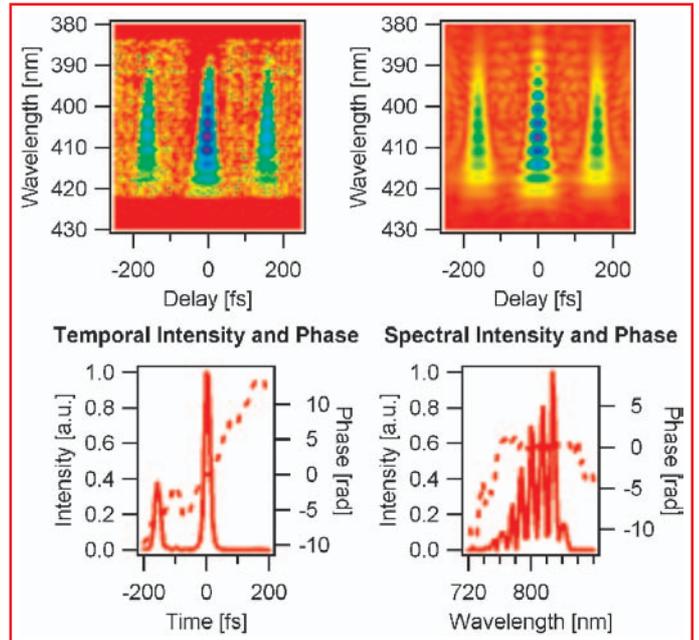
Kollineare Strahlen vermeiden dieses Problem, aber man bekommt durch sie nicht weniger als fünf empfindliche einstellbare Freiheitsgrade. Außerdem brauchen kollineare Strahlen einen Translationstisch um die Verzögerung über viele Pulse zu scannen, weshalb die Datenaufnahme langsam ist.

Das FROG-System löst diese Aufgaben auf ungewöhnliche Weise. Obwohl es anstelle der geforderten dünnen relativ dicke Kristalle verwendet, kann es trotzdem extrem kurze Pulse mit ausreichender Bandbreite messen. Und zwar weil die sehr restriktive Frequenzverdopplungs-Bandbreiten-Bedingung, die dünne Kristalle fordert und für viele Jahre fraglos akzeptiert wurde, so nicht richtig ist: Tatsächlich ist es nicht nötig, für jeden Puls der Messung ausreichende Bandbreite zu haben. Es genügt, wenn die Bandbreite über die gesamte Messung stimmt. Während also der dicke Kristall deutlich weniger Bandbreite hat als der Puls, wird die insgesamt notwendige Bandbreite durch schnelle Variation des Winkels (angle-dithering) und die zeitliche Integration über viele Dither-Perioden erreicht. So wird die Bandbreite nicht durch die Dicke des Kristalls sondern durch den Bereich des Dither-Winkels festgelegt, und es können dicke, effiziente und leicht handhabbare Kristalle verwendet werden. Indem beispielsweise der Winkel um 30° zittert, können mit einem 100 µm dicken BBO-Kristall 10 fs kurze Pulse gemessen werden.

Da die GVD-Bedingung nicht so streng ist wie die alte Bandbreiten-Bedingung, nimmt die GVD durch den relativ dicken Kristall nicht signifikant zu. Um die GVD insgesamt zu minimieren, muss vor dem Kristall der Weg des Pulses im Material

reduziert werden. Dies kann schwierig sein, wenn der Puls in einem Strahlteiler geteilt und zusätzlich fokussiert werden muss, lässt sich aber realisieren indem die meisten refraktiven Optiken durch Spiegel und der Strahlteiler durch einen Teilerspiegel ersetzt werden, die keine GVD bewirken und einen sehr einfachen und eleganten Aufbau ermöglichen.

Auch die Lösung für das geometrische Schmierens widerspricht auf den ersten Blick dem gesunden Menschenverstand: Sehr breite unfokussierte Strahlen werden absichtlich unter einem großen Winkel gekreuzt. Dadurch variiert die relative Verzögerung um mehr als die Pulslänge entlang des Kristalls. Die benötigte Verzögerung wird nicht wie üblich über einen verfahrenbaren Spiegel eingebracht, sondern in Abhängigkeit der transversalen Position im Kristall gemessen. Der Kristall wird auf eine Kamera abgebildet, die die Verzögerung entsprechend der Position aufnimmt. Das ermöglicht auch die Einzelpulsmessung, da alle Verzögerungen mit jedem Puls abgetastet werden. Wichtiger ist, dass die jetzt räumlich aufgelöste Verzögerungsvariation über den Kristall nicht mehr schmiert und somit keine querverstärkten geometrischen Effekte ergibt [1]. Es kann sogar gezeigt werden, dass andere mögliche geometrische Schmiereffekte für diese Geometrie ebenfalls verhindert werden. Das Kurzpuls-FROG misst die zwei wichtigsten räumlichen und zeitlichen Pulsstörungen, den räumlichen Chirp und die Neigung der Pulsfront [3,4]. Die normalerweise symmetrische Aufnahme der FROG-Sequenz zeigt eine Neigung, wenn räumlicher Chirp vorliegt. Die Neigung der Pulsfront dagegen ergibt eine Verschiebung entlang der Verzögerungsachse.

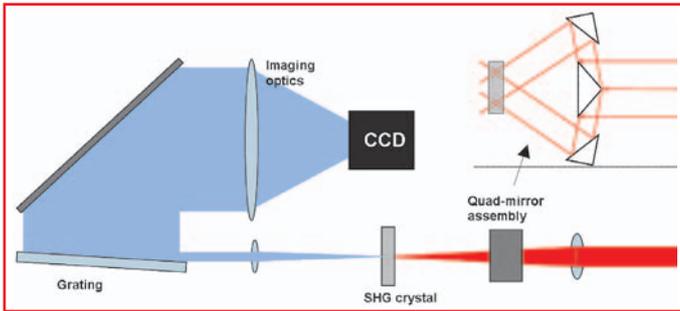


**Bild 3:** Messungen eines Doppelpulses aus zwei 10fs-Pulsen. Die durchgezogene Linie zeigt die Intensität, die gestrichelte die Phase.

Durch die weiten Strahlen, die sich unter großen Winkeln treffen, ist das System sehr einfach zu handhaben. Und da die Verzögerung nicht gescannt werden muss, liefert eine einzige Kamerasequenz die gesamte Messung, so dass Echtzeit-Messungen unkompliziert sind. Wegen der großen spektrale Bandbreite der fs-kurzen Pulse reicht ein Spektrometer mit sehr kurzen Pfadlängen, das relativ geringe, aber hier mehr als ausreichend spektrale Auflösung besitzt.

Der Aufbau eines einfachen Echtzeit-FROG Messsystems für Pulse von 10 fs Kürze ist in **Bild 2** zu sehen. Das System wurde mit einem Fabry-Perot-Etalon getestet und kalibriert, das die Pulse sowohl in Frequenz als auch in Zeit strukturiert. **Bild 3** zeigt die gemessenen und rekonstruierten FROG-Aufnahmen und die spektrale und zeitliche Intensität und Phase des Pulses. Das Spektrum deckt mehr als 100 nm Bandbreite ab.

Die Messung von relativ langen ultrakurzen Pulsen (einige ps) stellt eigene Aufgaben. Um die enge Bandbreite der Pulse aufzulösen, wird eine hohe spektrale Auflösung benötigt. Dies wäre durch einen sehr langen Pfad im Spektrometer möglich. Damit das Gerät kompakt bleibt, wird stattdessen ein Gitter mit hoher Strukturdichte unter streifendem Einfallswinkel eingesetzt, um alle Linien zu beleuchten. Dadurch wird die hohe spektrale Auflösung ohne lange Strahlwege erzielt. Ein einfaches 50 mm langes Gitter mit 2400 Linien/mm löst spektrale Strukturen von 0,08 nm auf.



**Bild 4:** Aufbau zur Messung von ps-Pulsen. Der engbandige frequenzverdoppelte Puls wird mit einem Gitter für streifenden Einfall spektral aufgelöst. Der Vierfachspiegel teilt den Strahl und kreuzt die Hälften unter großem Winkel, für eine große relative Verzögerung.

Diese spektrale Auflösung reicht für die Spektren von ps-Pulsen aus, die so in einem sehr kompakten Gerät aufgelöst werden können.

Ein weiterer Punkt der Messung langer Pulse ist die benötigte lange Verzögerung. Für eine Verzögerung um 20 ps in einer Einzelschuss-Geometrie werden zwei große linienfokussierte Strahlen unter 50° gekreuzt, der größte Winkel, der in einem BBO-Kristall noch Phase-matching erlaubt (**Bild 4**). Der kompakte und einfache FROG kann auf diese Weise Pulse von 5 ps messen.

Die FROG-Geräte für extrem kurze und relativ lange Ultrakurzpulse sind deutlich einfacher aufgebaut und leichter zu handhaben als Autokorrelatoren. Sie messen außerdem die gesamte Pulsintensität und Phase gegenüber der Zeit und Frequenz, sowie die beiden wichtigsten räumlichen

für 100 fs, mit der einfachen GRENOUILLE-Strahlgeometrie [1] sind sehr einfach zu bedienen. Durch die neuesten deutlichen Steigerungen der Geschwindigkeit der FROG-Pulsberechnungsalgorithmen können auf den meisten Laptops jetzt Pulse mit 20 Hz rekonstruiert werden. Daher eignen sich alle diese Geräte für die Messung der meisten heute gebräuchlichen ultrakurzen Pulse.

Übersetzung: E. Rosenthal

## Literaturhinweise

- [1] R. Trebino, *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002
- [2] P. O'Shea, M. Kimmel, X. Gu, and R. Trebino, *Increased bandwidth in ultrashort-pulse measurement using an angle-dithered nonlinear-optical crystal*, Opt. Expr. 7(10), 2000, pp. 342-349
- [3] S. Akturk, et al., *Measuring spatial chirp in ultrashort pulses using single-shot Frequency-Resolved Optical Gating*, Opt. Expr. 11, 2003, p. 68

- [4] S. Akturk, et al., *Measuring pulse-front tilt in ultrashort pulses using GRENOUILLE*, Opt. Expr. 11, 2003, p. 491

## Ansprechpartner

Selcuk Akturk  
 School of Physics  
 Georgia Institute of Technology  
 837 State St.  
 Atlanta, GA 30332, USA  
 Tel. +1 - 404 / 385-1223  
 Fax +1 - 404 / 385-0830  
 email: gtg397c@mail.gatech.edu  
 Internet: www.physics.gatech.edu/frog



Prof. Rick Trebino  
 School of Physics  
 Georgia Institute of Technology  
 837 State St.  
 Atlanta, GA 30332, USA  
 Tel. +1 - 404 / 894-1690  
 Fax +1 - 404 / 385-0830  
 email: rick.trebino@physics.gatech.edu  
 www.swampoptics.com



Oliver Tiller  
 Product Management  
 Assistant  
 Newport GmbH  
 Guerickeweg 7  
 D-64291 Darmstadt  
 Tel. 06151 / 708-932  
 Fax 06151 / 708-954  
 email: oliver.tiller@newport-de.com  
 Internet: www.newport.com



www.photonik.de ▶ Webcode 2051