

Wellenleitermodulatoren für neue Einsatzgebiete

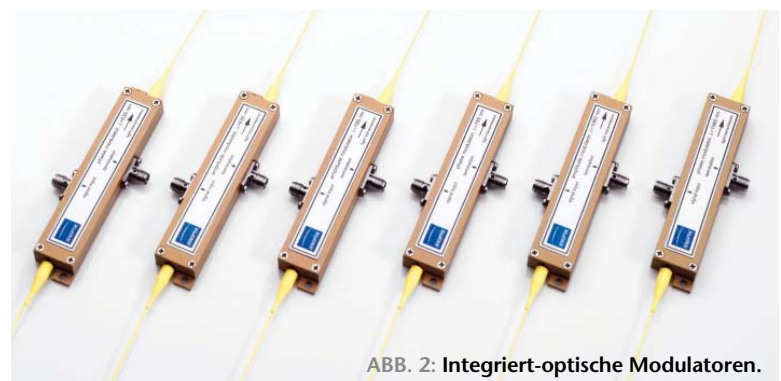
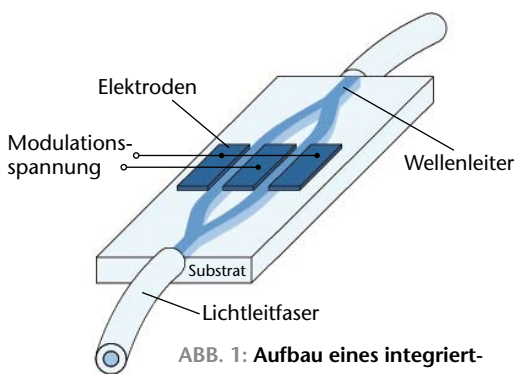
Vergrößerung von Leistungsfestigkeit und spektraler Breite erweitern Anwendungsspektrum

● Integriert-optische Modulatoren werden vielfach in der optischen Telekommunikation eingesetzt. Durch Modifikation der Herstellungs- und Aufbautechnik kann nun auch eine schnelle Modulation von Licht hoher Leistung im Nahinfraroten, die Verarbeitung ultrakurzer Pulse und die Modulation von sichtbarem Licht erfolgen. Das eröffnet neue Anwendungen in den Bereichen Lasermaterialbearbeitung, Photo- und Displaytechnik sowie in der Messtechnik.

Die Entwicklung integriert-optischer Wellenleiterbauelemente wurde bislang vorwiegend durch die optische Telekommunikation vorangetrieben. So sind beispielsweise Vielfachverzweiger, Wellenlängenmultiplexer und elektrooptische Modulatoren mit Bitraten im Bereich einiger zehn Gigabit pro Sekunde für die Telekommunikation auf dem Markt verfügbar und in großen Stückzahlen im Einsatz. In der Sensorik sind integriert-optische Bauelemente unter anderem in optischen Rotationssensoren (Gyroskopen) vertreten. Dabei bedeutet integriert-optisch analog zur Mikroelektronik die Kombination von lichtführenden Kanälen (Wellenleiter) und weiteren miniaturisierten Elementen wie z. B. Elektroden oder elektrischen Schaltungen auf einem ebenen Substrat. Diesen Anwendungen ist gemeinsam, dass die Arbeitswellenlängen im infraroten Bereich liegen und die Lichtleistung auf einige Milliwatt beschränkt ist.

In den letzten Jahren zeichnen sich jedoch weitere Einsatzgebiete für die integrierte Optik ab. Insbesondere in Bereichen, in denen eine breitbandige Amplituden- bzw. Phasenmodulation mit Frequenzen über 100 MHz bis weit in den Gigahertzbereich gefordert ist, stellen integriert-optische Modulatoren die einzige Alternative dar. Solche Einsatzgebiete sind beispielsweise Teilbereiche der Lasermaterialbearbeitung, speziell die Faserlasertechnik, die Photo- und Displaytechnik oder biomedizinische Screeningtechniken auf Basis der zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie. Gegenüber den konventionellen Anwendungen sind hier wesentlich höhere optische Leistungen im Infraroten bzw. auch Wellenlängen des sichtbaren Spektralbereichs mit entsprechend höherer Photonenenergie zu verarbeiten. Diese Anforderungen konnten von den bisher verfügbaren Wellenleitermodulatoren nicht erfüllt werden.

Das Basiselement ist der fasergekoppelte Mach-Zehnder Amplitudenmodulator auf der Basis des ferroelektrischen Kristallmaterials Lithiumniobat (Abbildungen 1 und 2). Die Modulation erfolgt durch Verstimmung des Wellenleiter-Interferometers mit Hilfe zweier Phasenmodulatoren in den Interferometerzweigen. Die Phasenverschiebung wird durch den linearen elektrooptischen Effekt bewirkt, welcher eine Brechzahländerung zwischen den an den Wellenleitern angeordneten Elektrodenpaaren bei Anlegen einer elektrischen Spannung erzeugt [1]. Aufgrund des interferometrischen Wirkungsprinzips



DER AUTOR

JENS-PETER RUSKE

Jens-Peter Ruske diplomierte 1993 im Fach Physik, promovierte 1996 und habilitierte 2004



am Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena. In dieser Zeit entwickelte er verschiedene Wellenleiterbauelemente speziell für den sichtbaren Wellenlängenbereich und hohe geführte optische Leistungen. Im Jahr 2001 gründete er mit drei weiteren Kollegen des Instituts und der LINOS AG die Guided Color Technologies GmbH zur Produktion von integriert-optischen Modulatoren und Faserlasern für den sichtbaren Spektralbereich. Nach der Verschmelzung der Guided Color Technologies GmbH mit der Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH 2006 verantwortet er hier die Entwicklung und Produktion von integriert-optischen Modulatoren.

●● Dr. rer. nat. habil. Jens-Peter Ruske
JENOPTIK | Optische Systeme
Geschäftsbereich Digital Imaging
JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH
Göschwitzer Straße 25
07745 Jena, Deutschland
Tel.: +49 3641 65-4530
Fax: +49 3641 65-3807
E-Mail: jens-peter.ruske@jenoptik.com
Website: www.jenoptik.com/os

ergibt sich eine Übertragungskennlinie, die durch eine quadratische Cosinusfunktion beschrieben werden kann (Abbildung 3). So ist eine Amplitudenmodulation zwischen einem maximalen und einem minimalen Lichtleistungswert (P_{\max} bzw. P_{\min}) möglich. Die Spannung zwischen maximaler und minimaler Transmission wird auch als Halbwellenspannung bezeichnet. Für manche Anwendungen ist man bestrebt, möglichst geringe Werte minimaler Transmission zu erreichen. Dies muss durch entsprechende Präzision bei der Kristall- und Bauelementherstellung erfolgen.

Die Herstellung der Wellenleiterkristalle erfolgt mittels Ionenaustausch durch eine strukturierte Diffusionsmaske. Anschließend werden die Elektroden aufgebracht und der Kristall feinoptisch bearbeitet. Die angewendeten mikrolithographischen Verfahren zur Erzeugung der Strukturen mit einer Präzision im Submikrometermaßstab auf Einkristallwafern entsprechen denen der Mikroelektronik (Abbildung 4). Infolge der Notwendigkeit des Einmodenbetriebs belaufen sich die Wellenleiterquerschnittsflächen je nach Wellenlänge auf Werte zwischen 6 und 60 Quadratmikrometer.

Aufgrund der Verwendung modifizierter Substratkristalle, hoher Strukturpräzision und spezieller Maßnahmen bei der Modulatorherstellung ist es gelungen, einerseits den Bereich möglicher Arbeitswellenlängen vom infraroten auf den sichtbaren Spektralbereich auszudehnen, andererseits können nun für Wellenleiteranwendungen vergleichsweise hohe Lichtleistungen verarbeitet werden. Beispielsweise widerstehen die Modulatoren bei 1060 nm Leistungen von mehr als 300 mW im kontinuierlichen und mehr als 100 mW mittlerer Leistung im Ultrakurzimpulsbetrieb. Ebenso können zuverlässig Auslöschungsverhältnisse P_{\max}/P_{\min} von weit über 1000:1 erreicht werden.

Beispielhaft soll hier der Einsatz integriert-optischer Modulatorbauelemente für die Modulation ultrakurzer Pulse sowie die steuerbare Laserpuls erzeugung beschrieben werden. Die Anwendung in anderen Einsatzbereichen ist analog zu betrachten.

Modulation ultrakurzer Pulse

In der modernen Lasertechnik werden zunehmend Lasersysteme eingesetzt, die ultrakurze infrarote Lichtpulse mit sehr hohen Pulsenergien emittieren. Ihre Anwendungsgebiete liegen im Bereich des Tests elektronischer Schaltkreise und in den Bereichen der Mikromaterialbearbeitung, wo sehr präzise Material abgetragen werden muss [2]. Die Erzeugung ultrakurzer Pulse kann in sehr komplizierten Titan-Saphir-Lasersystemen er-

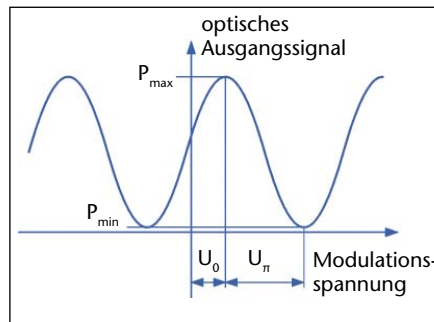


ABB. 3: Übertragungskennlinie eines integriert-optischen Amplitudenmodulators.

folgen, die extrem justieraufwändig und für eine industrielle Anwendung noch nicht geeignet sind. Weiterhin werden passiv modengekoppelte Nd:Glas-Laser verwendet, die Pulse mit Längen im Bereich von 100 fs bei einer Wiederholrate um 100 MHz emittieren.

Neben diesen aus konventionellen volumenoptischen Komponenten zusammengesetzten Lasersystemen gewinnen Faserlaser- bzw. Faserverstärkersysteme zunehmend an Bedeutung [3]. Deren Vorteile sind die hohe Verstärkung, die hohe Strahlstabilität sowie der einfache und robuste Aufbau.

Einige Anwendungen dieser gepulsten Lasersysteme, z.B. der Test elektronischer Schaltkreise, erfordern die Bereitstellung von Einzelpulsen, andere Anwendungen, z.B. in Oszillator-Verstärker-Systemen, erfordern eine Senkung der Wiederholrate von meist etwa 80 MHz unter 1 MHz, um eine optimale Verstärkung zu erzielen. Zu diesen Zwecken benötigt man schnelle Modulatoren (Pulspicker), die in der Lage sind, aus den schnellen Pulszügen einzelne Pulse auszuwählen und zu transmittieren. Stand der Technik sind akusto-optische Pulspicker. Diese sind relativ groß und justieraufwändig und die Modulationsfrequenz ist limitiert, so dass das Ausschneiden von Einzelpulsen nicht vollständig möglich ist. Für faserop- tische Laserkomponenten und einer für akusto-optische Modulatoren zu hohen Oszillator-Repetitionsrate von 70 MHz und höher

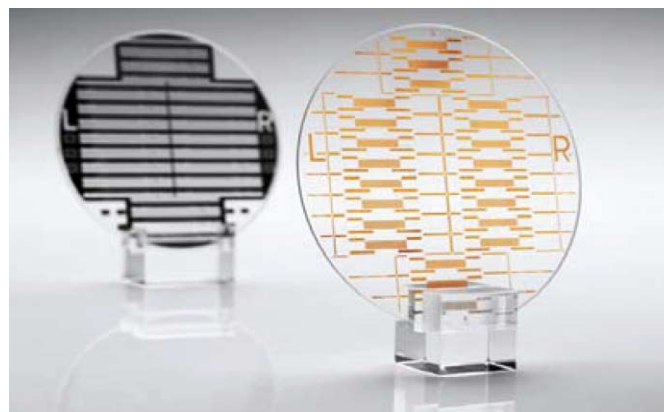


ABB. 4: Strukturierte Lithiumniobatwafer als Zwischenstadium der Modulatorherstellung.

● DIE FIRMA

Jenoptik

Jena

Jenoptik ist Spezialist für photonische und mechatronische Technologien und gehört in ausgewählten Bereichen zu den Markt- und Technologieführern.

Die Sparte Optische Systeme zählt zu den wenigen Herstellern weltweit, die Präzisionsoptiken und Systeme für höchste Qualitätsansprüche fertigen. Neben optomechanischen & optoelektronischen Systemen, Modulen und Baugruppen ist die Sparte Entwicklungs- und Produktionspartner für optische, mikrooptische und beschichtete optische Komponenten – aus optischem Glas, Infrarotmaterialien und aus Kunststoffen.

www.jenoptik.com/os

bietet sich der Einsatz integriert-optischer Amplitudenmodulatoren aufgrund der fasergekoppelten Ausführung und der hohen Modulationsgeschwindigkeit an. An diese Bauelemente werden jedoch sehr hohe Ansprüche gestellt. Sie sollten eine selektive Pulsunterdrückung mit dem Lösungsverhältnis von mindestens 1000:1 bei einer mittleren optischen Leistung in der Eingangsfaser von etwa 100 mW bei 1060 nm ermöglichen. Das entspricht bei Pulslängen um 100 fs einer Pulsspitzenleistung von über 300 W. Um einzelne Pulse exakt ausschneiden zu können, muss die Anstiegszeit der Modulatortransmission unter 3 ns betragen. Während letzteres kein Problem darstellt, müssen um die geforderte Lichtleistungsfestigkeit und das Lösungsverhältnis sicherzustellen, besondere Vorkehrungen getroffen werden. Dies ist durch den Einsatz speziell modifizierter Substratkristalle und Wellenleiterherstellungsverfahren in Verbindung mit einer ausgefeilten Mikrostrukturtechnik gelungen.

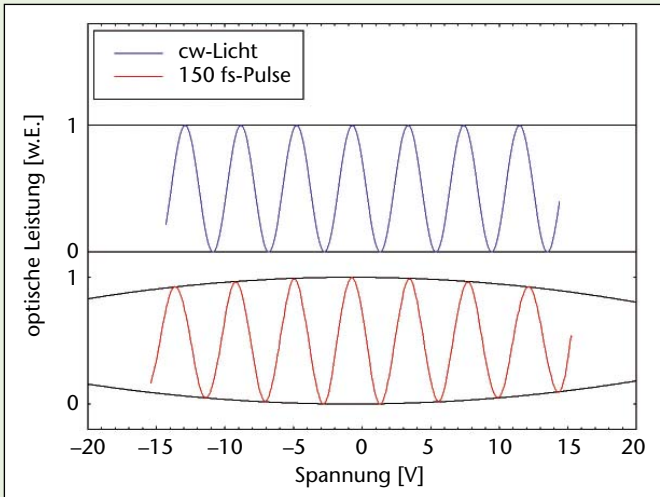


ABB. 5:
Modulator-
kennlinie bei
kontinuier-
lichem bzw.
gepulstem
Licht.

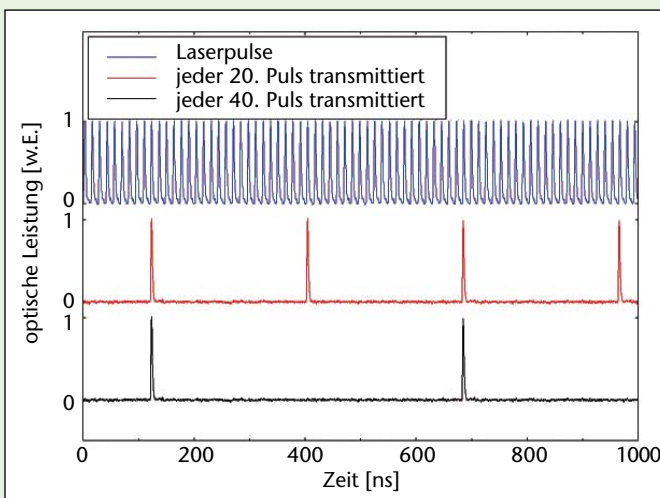


ABB. 6:
Optische
Funktion des
Pulspickers.

Zu beachten ist, dass im Falle der Bestrahlung mit Pulsen einer spektralen Breite im Bereich einiger zehn Nanometer das Lösungsverhältnis aufgrund des interferometrischen Funktionsprinzips von der Ordnung der Interferenz abhängt. Für eine gute Pulsunterdrückung muss um die nullte Ordnung der Interferenz gearbeitet werden (Abbildung 5).

Als Ausführungsbeispiel ist in Abbildung 6 gezeigt, wie mittels eines integriert-optischen Modulators beispielsweise jeder 20. bzw. jeder 40. Puls aus dem Pulszug eines Nd-Glas-Oszillators (Repetitionsrate 76 MHz, Pulslänge 150 fs, mittlere Leistung 100 mW) transmittiert wird. Mit der vorliegenden Treiberelektronik ist es möglich, Einzelpulse zwischen jedem 3. bis jedem 4000. Puls auszuschneiden. Diese Elektronik entnimmt das Synchronsignal zur Triggierung des Modulators einer im Lichtweg angeordneten Photodiode und bereitet dieses über einen Zähler und eine Verzögerungsstrecke zur Modulatorsteuerung auf. Durch Kopplung des Modulators mit gepulsten Faserverstärkern bzw. Faserverstärkern kann

so eine vollständig faserbasierte und somit justierfreie Laserpulsquelle mit variabler Wiederholrate geschaffen werden.

Variable Laserpulsquelle

In der Laserentfernungsmessung, LIDAR, bzw. der Lasermikromaterialbearbeitung werden Laserpulsquellen benötigt, die hinsichtlich der Repetitionsrate, der Pulslänge und Pulsform variabel steuerbar sind. Häufig werden Pulsenergien um 1 μ J, Wiederholraten um 100 kHz und Pulsängen im Bereich weniger Nanosekunden benötigt. Diese Seed-Pulse werden anschließend auf Pulsenergien um 1 mJ verstärkt. Manche Einsatzgebiete fordern zudem Augensicherheit, d.h. Wellenlängen über 1500 nm.

Im Gegensatz zu passiv modengekoppelten Lasersystemen bieten Systeme mit Modulator die Möglichkeit, Pulse nahezu beliebiger Form, Länge und Wiederholrate zu erzeugen. Die Kombination aus kontinuierlich emittierender Lichtquelle, Modulator und Lichtleitfaserverstärker ermöglicht beispielsweise, Pulse zwischen 1 und 100 ns bei Repe-

In-stock and Available PRECISION BIOTECH OPTICS

From DNA SEQUENCING
to MICROSCOPY
to MEDICAL DEVICES

Copyright©
Dennis Kunkel
Microscopy, Inc.

Objectives for
Microscopy

Aspheres for
Precision Imaging

Filters with
High Transmission &
Deep Blocking

NEED A VOLUME OPTICS QUOTE?

Contact our Sales Department today
or to receive your **FREE** catalog!

more optics | more technology | more service

EO Edmund
optics | worldwide

USA: 1-856-547-3488 | www.edmundoptics.com
EUROPE: 44 (0) 1904 691469 | www.edmundoptics.eu
ASIA: 65 6273 6644 | www.edmundoptics.com.sg
JAPAN: 81-3-5800-4751 | www.edmundoptics.jp

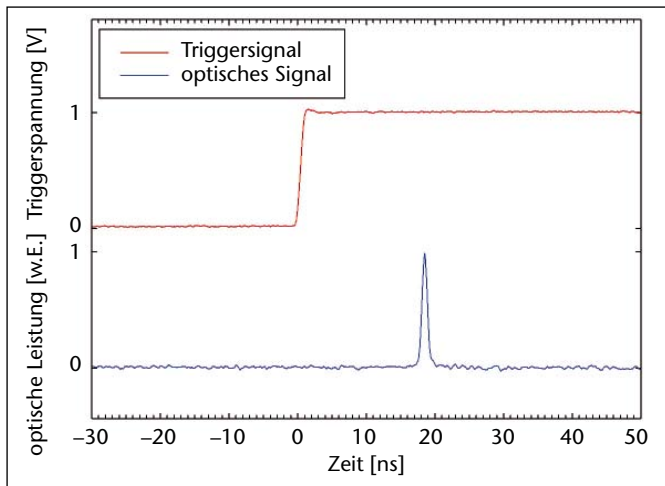


ABB. 7: Puls der Länge 1 ns.

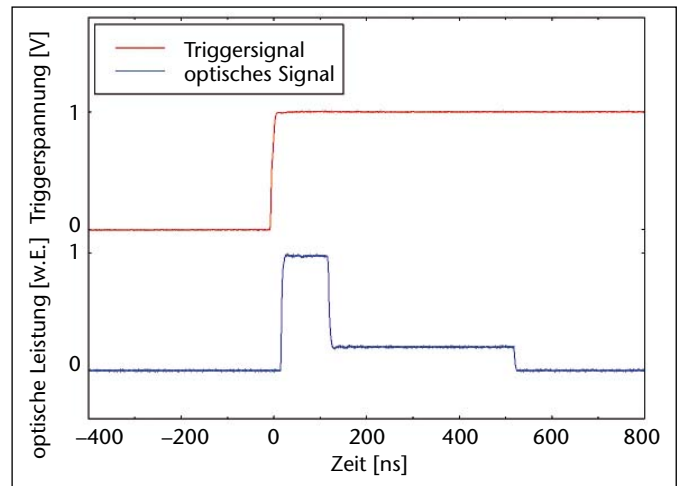


ABB. 8: Mehrstufiger Puls.

tionsraten zwischen 10 kHz und 10 MHz bei einem Lösungsverhältnis bis 1000:1 zu erzeugen. Die Pulsform wird durch den Modulator vorgegeben, die Pulsenergie ist vom Aufbau des Verstärkersystems abhängig. Aufgrund der kurzen Schaltzeit der Modulatoren von weit unter 1 ns können nahezu beliebige Pulsformen erzeugt werden [4]. So ist es beispielsweise möglich, die Amplitude im Puls zu variieren oder dem Puls eine Codierung aufzuprägen. Abbildung 7 zeigt einen Laserpuls der Länge von 1 ns, der auf ein elektrisches Triggersignal folgt. In Abbildung 8 ist gezeigt, wie der Modulator aus kontinuierlichem Licht einen Puls mit zeitlich variierender Leistung ausschneidet. Solche Pulsformen sind für bestimmte Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung notwendig.

Weitere Anwendungen

Ebenfalls neu ist der Einsatz integriert-optischer Modulatoren im sichtbaren Wellenlängenbereich des Lichts. Beispielsweise werden in der Biomedizin für die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie kurze Lichtpulse vorwiegend im grünen und blauen Spektrum

benötigt, die mit integriert-optischen Modulatoren erzeugt werden können.

Ebenso ist es möglich, diese Bauelemente für schnelle abbildungsschreibende Verfahren wie zum Zwecke der digitalen Photobelichtung einzusetzen. Hier wird rotes, grünes und blaues Laserlicht zunächst selektiv amplitudenmoduliert, überlagert und schließlich mit einem Ablenssystem, synchron zur Modulation, eine Abbildung Pixel für Pixel auf einer photo-sensitiven Fläche, im allgemeinen Photopapier, erzeugt.

Weiterhin kann man in interferometrischen Meßsystemen fasergekoppelte Phasenmodulatoren beispielsweise zum Modulieren der Referenzwelle anwenden. Die Lichtführung in der Lichtleitfaser garantiert hierbei eine exzellente Strahlqualität nach der Lichtauskopplung. Ebenso ist mit Phasenmodulatoren eine Frequenzfeinabstimmung von Laserlinien möglich.

In allen Einsatzbereichen werden Schaltzeiten unter 1 ns bzw. Frequenzen im Gigahertz-Bereich benötigt, die nur mit integriert-optischen Bauelementen erzeugt werden können. Deren Faserschnittstelle garantiert einen kompakten, einfachen und justierfreien Aufbau bei guter Strahlgestabilität.

Ausblick

Aufgrund der spezifischen Vorteile faseroptischer Systeme und deren zunehmender Verbreitung bietet sich der Einsatz integriert-optischer Bauelemente, speziell Modulatoren an. So werden die aufgebauten Systeme störunanfällig und stabil, technisch vielseitig und infolge teilautomatisierter Fertigung in hohen Stückzahlen preisgünstig.

Referenzen

- [1] E. J. Murphy, Integrated optical circuits and components, Marcel Dekker (1999), ISBN 8-8247-7577-5
- [2] S. Nolte, Micromachining, in M.E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha (Eds.): Ultrafast Lasers, Marcel Dekker (2003) ISBN 0-8247-0841-5
- [3] M. E. Fermann, Ultrafast Fiber Oscillators, in M. E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha (Eds.): Ultrafast Lasers, Marcel Dekker (2003) ISBN 0-8247-0841-5
- [4] R. Murison, T. Panarello, B. Reid, R. Boula-Picard, P. Deladurantaye, R. Larose, Y. Taillon, F. Brunet, Method and system for tunable laser source, US2007/0268942A1 (2007)