

# Ein faserintegriertes Konzept zur Abstimmung der Emissionswellenlänge gepulster Faserlaser mit Faser-Bragg-Gitter Arrays als spektrale Filter

Tobias Tiess\*, Manfred Rothhardt\*, Christoph Chojetzki\*\*, Matthias Jäger\*, Hartmut Bartelt\*\*\*\*

\* Leibniz-Institut für Photonische Technologien (IPHT), Jena

\*\* FBGS Technologies GmbH, Jena

\*\*\* Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-Universität Jena

mailto: tobias.tiess@uni-jena.de

In dieser Arbeit wird ein neues Abstimmprinzip für die Emissionswellenlänge gepulster Faserlaser vorgestellt, das auf einem Faser-Bragg-Gitter (FBG) Array als spektralem Filter basiert. Die experimentelle Untersuchung demonstriert über einen Abstimmbereich von  $18\text{ nm}$  hervorragende spektrale Eigenschaften hinsichtlich Wellenlängenstabilität und Signalkontrast.

## 1 Einführung

Lasersysteme mit einstellbarer Emissionswellenlänge besitzen eine große Bedeutung für alle optischen Anwendungen, die eine spektrale Abhängigkeit hinsichtlich der verwendeten Lichtquelle zeigen. Neben verschiedenen Bereichen in der Telekommunikation [1] zeigen besonders spektroskopische Anwendungen eine starke Abhängigkeit von abstimmbaren Lasern [2]. Als anregende Lichtquelle finden solche Systeme nicht nur in klassischen Transmissions- und Absorptionsmessungen Verwendung, sondern werden insbesondere auch in neuartigen Analysemethoden wie z.B. RAMAN, CARS oder SERS Spektroskopie verwendet. Dabei muss sich die eingesetzte Lichtquelle immer größeren Anforderungen bezüglich ihrer Brillanz und spektralen Flexibilität stellen.

Eine vielversprechende Grundlage für die Entwicklung geeigneter Lichtquellen stellen Faserlaser dar. Basierend auf der Wellenleiterstruktur zeichnen sich solche Systeme nicht nur durch eine exzellente Strahlqualität im Einmodenbetrieb und eine hohe Energieeffizienz aus, sondern bilden im monolithischen Aufbau die Grundlage für robuste, kompakte und damit anwenderfreundliche Systeme. Zusammen mit den breiten spektralen Verstärkungsbändern aktiver Laserfasern, die einen Betrieb des Systems über große Wellenlängenbereiche ermöglichen, sind Faserlaser damit ein idealer Ausgangspunkt für die Entwicklung abstimmbarer Laserquellen für spektroskopische Anwendungen.

Zur Implementierung der Wellenlängenabstimmbarkeit wird ein einstellbarer spektraler Filter in den Laserresonator integriert. Hierfür mangelt es jedoch an geeigneten Möglichkeiten. Einerseits basieren externe Filter wie z.B. Fabry-Pérot Filter oder Beugungsgitter [2] auf einer Freistrahlkopplung, sodass die Vorteile monolithische Faseretzwerke verloren gehen. Auf der anderen Seite bieten Faser-Bragg-Gitter (FBG) als schmalbandi-

ge Spiegel, die in den Kern der Faser eingeschrieben sind, nur geringe spektrale Freiheiten, da sich ihre Reflektionswellenlänge  $\lambda_{FBG}$  nur in kleinen Bereichen durch Temperaturveränderungen oder Faserdehnung/-stauchung abstimmen lässt [2].

In dieser Arbeit wird ein neuartiges Abstimmkonzept für gepulste Faserlaser vorgestellt, das sowohl auf einem faserintegrierten Design beruht, als auch große spektrale Freiheiten besitzt. Basierend auf einem FBG Array als Filterelement zeigt diese Methode großes Potential für sowohl große Abstimmbereiche, als auch individuell auf eine Anwendung zugeschnittene Emissionseigenschaften.

## 2 FBG Array als spektraler Filter

Als spektraler Filter für den abstimmbaren Laser dient ein FBG Array. Wie in Abb.1 dargestellt besteht diese Struktur aus  $N$  FBG, die mit unterschiedlichen Reflektionswellenlängen  $\lambda_{FBG,i}$  ( $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ) und an verschiedenen Positionen entlang der Faser eingeschrieben sind, sodass sie einen räumlichen Abstand von  $\Delta z$  besitzen. Durch das kombinierte Feedback aller FBG deckt der reflektive Filter einen großen spektralen Bereich ab. Der Vorteil dieses Design ergibt sich durch eine Einschreibung der FBG während des Faserziehens [3]. Basierend auf sogenannten Ziehturm-gittern können beinahe beliebig viele FBG mit jeweils unabhängig wählbaren Reflektionswellenlängen in eine Faser eingeschrieben werden, sodass das Filterdesign viele spektrale Freiheiten bietet.

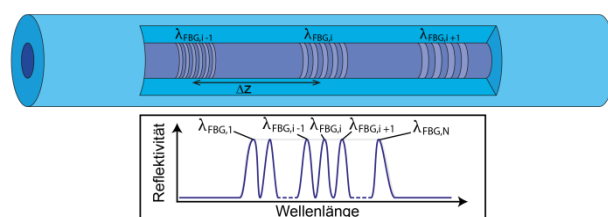


Abb. 1 Detailausschnitt vom schematischen Aufbau eines FBG Arrays bestehend aus  $N$  FBG. Im unteren Graph ist das zugehörige Reflektionsspektrum skizziert.

Das umfasst sowohl große Wellenlängenbereiche mit angepasster spektraler Auflösung, als auch diskrete und kalibrierte Filterlinien.

### 3 Neues Abstimmprinzip

Zum Abstimmen der Emissionswellenlänge  $\lambda_{Laser}$  des Lasers wird die Eigenheit des FBG Array genutzt, dass jedes Gitter an einer anderen Position entlang der Faser eingeschrieben ist. Dadurch besitzen Pulse unterschiedlicher Wellenlängen verschiedene Laufzeiten im Filter. In Abb. 2 ist der Filter über einen optischen Zirkulator in einen Ringresonator integriert, der zudem aus einem Auskoppler, einem verstärkendem Element (die aktive Laserfaser) und einem optischen Modulator besteht, der das System durch periodisches Schalten der Resonatorverluste pulst. In dieser Konfiguration führt die spektrale Abhängigkeit der Antwortzeit des FBG Array dazu, dass die Umlaufzeit  $T_{RT}$  für Pulse im Resonator von deren Wellenlänge abhängt. Durch eine an die Pulsumlaufzeit angepasste Modulationsperiode kann  $T_{RT}$  mit Hilfe des Modulators vorgegeben werden. Somit kann ein spezifisches Gitter aus dem FBG Array als effektives Feedbackelement für den Laserbetrieb angesteuert werden, sodass der Laser spektral auf der zugehörigen Reflektionswellenlänge anschwingt. Folgerichtig fungiert die Modulationsperiode  $T_{RT}$  als spektraler Abstimmparameter, der  $\lambda_{Laser}$  zwischen dem Feedback verschiedener FBG schalten kann.

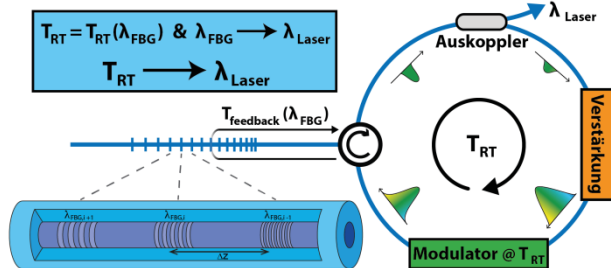


Abb. 2 Skizze des abstimmbaren Lasers in einer Ringresonatoranordnung mit FBG Array. Die am Modulator einstellbare Pulsumlaufzeit  $T_{RT}$  kontrolliert  $\lambda_{Laser}$ .

### 4 Experimentelle Ergebnisse

Für die experimentelle Untersuchung des vorgestellten Prinzips wurde ein Ytterbium dotierter Faserlaser nach dem Schema in Abb. 2 aufgebaut. Zum Schalten der Resonatorverluste wird ein Akustooptischer Modulator eingesetzt, der über einen Funktionsgenerator steuerbar und programmierbar ist. Als FBG Array kommt ein Testdesign mit 73 Gittern zum Einsatz, das einen Wellenlängenbereich von 18 nm (1052 nm - 1070 nm) abdeckt. Das charakteristische Abstimmverhalten des realisierten Faserlasers ist in Abb. 3 dargestellt. Man erkennt, wie sich die Emissionswellenlänge des Lasers in Abhängigkeit der Modulationsperiode über einen Bereich von 18 nm verschiebt. Damit ergibt sich genau das angestrebte

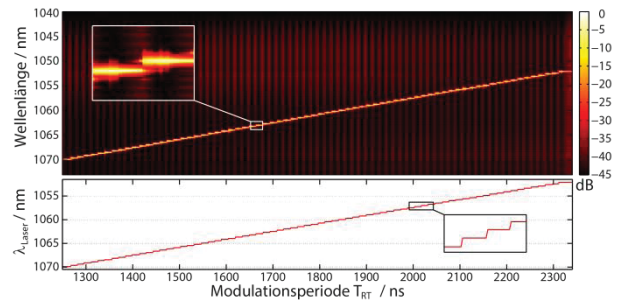


Abb. 3 Das spektrale Abstimmverhalten des gepulsten Lasers dargestellt im Tuning Spektrogramm und durch den Verlauf von  $\lambda_{Laser}$  über den Abstimmparameter  $T_{RT}$ . Der Durchstimmbereich spannt 18 nm auf.

Verhalten mit  $T_{RT}$  als spektraler Abstimmparameter. Passend zum FBG Array zeichnet sich der Laser durch eine schmale Linienbreite von etwa 50 pm aus. Wie in der Detailansicht zu erkennen, schwingt der Laser spektral stets über ein FBG an. Das Feedback benachbarter FBG führt zu keiner Beeinträchtigung der spektralen Reinheit. Im unteren Teil von Abb. 3 ist der extrahierte Verlauf von  $\lambda_{Laser}$  dargestellt. Die stufenförmige Gestalt spiegelt direkt den diskreten Charakter der eingeschriebenen FBG im Filter wieder. Innerhalb der Wellenlängensprünge zeigt der Laser eine exzellente spektrale Stabilität, die auch über einen breiten Arbeitsbereich des Lasers (verschiedene Pulsdauern & Leistungsbereiche) experimentell bestätigt werden konnte. Zusammen mit dem sehr guten spektralen Kontrast von mehr als 40 dB deutet dies auf eine exzellente Kopplung zwischen dem spektralen Filter und der Laseremission hin.

### 5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein faserintegriertes Abstimmkonzept für gepulste Faserlaser vorgestellt, das auf FBG Arrays als spektrale Filter basiert. Bei einer schmalen Linienbreite von 50 pm und sehr guten Signalkontrast von teils deutlich über 40 dB wurde im Rahmen der ersten Untersuchungen ein Abstimmbereich von 18 nm realisiert. Basierend auf der großen spektralen Freiheit des FBG Array sind zukünftig jedoch deutlich breitere Abstimmbereiche und individuell auf die Anwendung zugeschnittene Emissionscharakteristika möglich. Zudem zeigt die Methode eine außergewöhnliche Wellenlängenstabilität und basiert auf einer einfach zu programmierenden zeitlichen Steuerung, die ohne mechanisch bewegliche Teile auskommt.

### Literatur

- [1] J. Buus, E.J. Murphy: „Tunable Lasers in Optical Networks“, J. Lightwave Technol. **24** (2006)
- [2] F. J. Duarte: „Tunable Laser Applications“, CRC Press (2<sup>nd</sup> Edition, 2009)
- [3] C. Chojetzki et al.: „High-reflectivity draw-tower fiber Bragg gratings—arrays and single gratings of type II“ Opt. Eng. **44**(6) (2005)