

MoLECL – Mode Locking External Cavity Laser Sensor, ein innovatives Messverfahren für die hochauflösende Metrologie

000 Jasper Möbius, Jürgen Czarske, Laser Zentrum Hannover e.V.; Joachim R. Sacher, Gerd Breidenstein, Richard Knispel, Sandra Stry, Lars Hildebrandt, Sacher Lasertechnik GmbH, Marburg; Thomas Müller-Wirts, TEM Messtechnik GmbH, Hannover

Ein neues Konzept für die kollineare Abstandsmessung mit einer Auflösung im Mikrometer-Bereich kombiniert in vorteilhafter Weise Messeigenschaften, die für Anwendungen in der industriellen Fertigungsmesstechnik interessant sind. Das Messprinzip des „modengekoppelten Externer-Resonator-Lasersensors“ sowie erste Erprobungen an technischen Oberflächen werden vorgestellt.

1 Einführung

In der Metrologie werden die Grundlagen der technischen Längen- und Abstandsmessung untersucht. Für höchste Genauigkeitsanforderungen und schnelle Messungen werden in der Regel optische Verfahren eingesetzt. Es haben sich, je nach Messaufgabe, verschiedene Messverfahren etabliert. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sollen die folgenden drei Beispiele genannt werden:

1.1 Triangulation

Hierbei wird ein Lichtstrahl auf eine technische Oberfläche gerichtet und das reflektierte Licht mit einem winkelseitigen Empfänger ortsaufgelöst detektiert. Die Abstandsinformation wird aus der Position des Lichtflecks auf einer Photodiodenzeile ermittelt. Mit Triangulation lassen sich für große Winkel zwischen dem Beleuchtungsstrahl und dem Streulichtstrahl Auflösungen von etwa einem μm erreichen.

1.2 Laufzeitmessmethoden

Hierbei wird z.B. ein optischer Lichtimpuls ausgesandt. Dieser Lichtimpuls wird von einem Reflektor oder einer rauen Oberfläche reflektiert und von einer Photodiode detektiert. Mit Laufzeitmessmethoden werden Auflösungen in der Größenordnung von einigen mm bei großen Messabständen erreicht.

1.3 Interferometrie

Interferometrische Messmethoden werden bei der Charakterisierung optischer Oberflächen eingesetzt, bei denen Genauigkeiten im Submikrometer-Bereich benötigt werden. Mit Interferometrie werden aber nur inkrementelle Positionsmessungen vorgenommen, d.h. der Eindeutigkeitsbereich ist auf relative Verschiebungen um die halbe Lichtwellenlänge begrenzt. Mehrwellenlängen-Interferometer oder Weißlichtinterferometer (Kohärenz-Radar) überwinden diesen Nachteil, weisen aber einen hohen technischen Aufwand und eine geringe Zeitauflösung auf.

2 Anwendungsbereiche

Jede der drei genannten Messmethoden besitzt ihre speziellen Messeigenschaften, so dass sie für manche Anwendungen besser geeignet ist als für andere. Die Entwicklung von Abstandssensoren

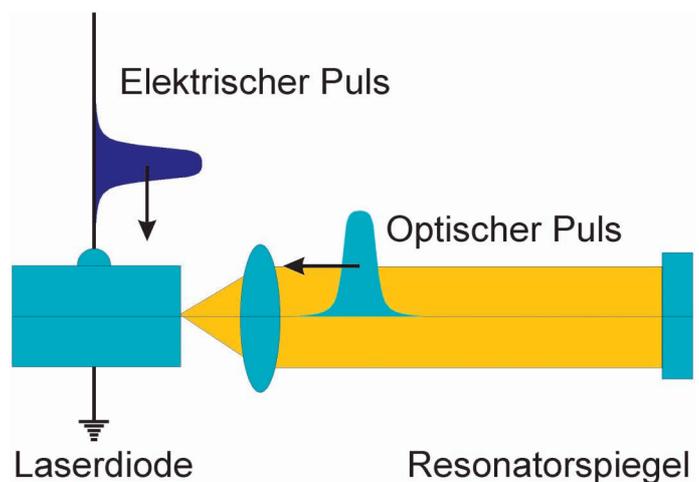


Bild 1: Schematischer Aufbau eines Diodenlasers mit externem Resonator. Die Laserdiode wird elektrisch über den Injektionsstrom moduliert. Der optische Resonator umfasst die Laserdiode und den externen Teil über die Kollimationsstrecke bis zum Resonatorendspiegel. Die Auskoppelfacetten des Diodenlasers sind mit einer Antireflexionsschicht mit einer Reflektivität $<10^{-4}</math; versehen.$

mit einer neuen Kombination von Messeigenschaften kann daher weitere Anwendungsfelder erschließen, z.B. in der Mikrosystemtechnik oder Nanotechnik.

Beispielsweise existiert derzeit kein industrietaugliches Verfahren, das während der Laserablation (Materialabtrag durch intensive Laserpulse) zuverlässige Abstandsmesswerte liefern kann. Wünschenswert ist es, den Ablationsprozess *in-situ* beobachten zu können, um bei Erreichen des Zielwerts den Prozess beenden zu können.

Herkömmliche Messmethoden zeigen bei diesen Anwendungen Schwächen. Laufzeitmethoden besitzen nicht die benötigte Auflösung, um den Genauigkeitsanforderungen von kleiner als $1\ \mu\text{m}$ genügen zu können. Triangulation könnte die Genauigkeitsanforderungen erfüllen, ist jedoch in der Nähe von Kanten nicht einsetzbar, da das Beobachtungslicht durch Kanten abgeschattet werden kann. Interferometrie stellt sehr hohe Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit, so dass diese Methode nicht universell einsetzbar ist. Zudem muss eine Synchronisation mit dem Bearbeitungslaser erfolgen, da eine Messung nur zwischen den Bearbeitungspulsen möglich ist. Daher können nur schnelle Sensoren eingesetzt werden.

Ein Zusammenspiel derartiger Messeigenschaften lässt sich mit einem Konzept wie dem des MoLECL-Sensors erreichen: kollineare Messung (geringe Abschattung), interferometrische Auflösung, hohe Messrate, Messung an technischen Oberflächen.

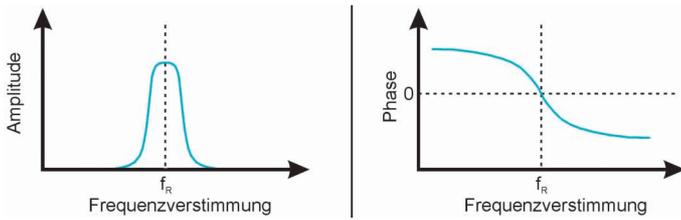


Bild 2: Resonanzverhalten bei Verstimmung Δf der Modulationsfrequenz gegenüber der Resonatorumlaufzeit f_R . Das linke Teilbild zeigt schematisch den Amplitudengang, das rechte Teilbild zeigt schematisch den Phasengang in der Umgebung der Resonatorumlaufzeit f_R .

3 Beschreibung des MoLECL Messverfahrens

Bei MoLECL werden Eigenschaften eines Diodenlasers im externen Resonator genutzt. **Bild 1** zeigt eine schematische Zeichnung eines solchen Lasersystems. Es besteht aus einer einseitig entspiegelten Laserdiode, einer Kollimationslinse sowie einem hochreflektierenden Resonatorendspiegel.

Der Frequenzabstand der longitudinalen Moden Δf dieses Extern-Resonator-Lasers steht über die Gleichung

$$\Delta f = \frac{c}{2nL} \tag{1.1}$$

in einer eindeutigen Beziehung zur geometrischen Länge L des Resonators (mit c : Vakuumlichtgeschwindigkeit, n : mittlerer Brechungsindex des Mediums). Im Zeitbild lässt sich der Frequenzabstand der Moden Δf als Kehrwert der Zeit verstehen, die ein Photon benötigt, um einmal im Resonator umzulaufen. Wird die Laserdiode elektrisch mit der Frequenz Δf moduliert, so werden die Resonatormoden phasenstarr gekoppelt, und das Lasersystem beginnt kurze optische Lichtimpulse zu emittieren mit Pulsbreiten in der Größenordnung von 1 ps bis 20 ps [1]. Diesen Effekt bezeichnet man als Modenkopplung.

Der Resonator lässt sich als Übertragungssystem betrachten. Als Eingang dient dabei die Strommodulation der Laserdiode, der Ausgang ist das emittierte zeitmodulierte Lichtsignal. In der Übertragungsfunktion zeigt sich ein typisches Resonanzverhalten wie in **Bild 2** dargestellt. Für die Resonanzfrequenz $f_R = \Delta f$ zeigt sich ein Maximum im Amplitudengang und ein Nulldurchgang in der Phasenverschiebung zwischen Anregungsstrom und emittierten Lichtpulsen.

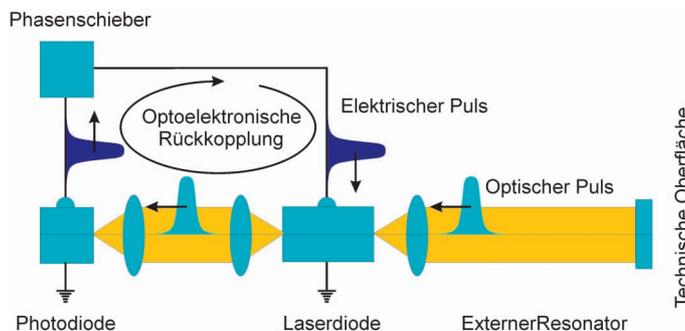


Bild 3: Schematischer Aufbau des optoelektronischen Modelockings. Rechts von der Laserdiode ist der optische Resonator. Links von der Laserdiode ist der optoelektronische Modulationskreis. Das Licht der Laserdiode wird mittels einer Photodiode detektiert. Deren elektrisches Signal wird verstärkt und unter Phaseanpassung der Laserdiode als Modulationssignal aufgeprägt.

Das Verfahren der Modenkopplung wurde 1990 von R. Nietzke, J. Sacher und W. Elsäber an der Uni Marburg weiterentwickelt. Hierbei wurde die externe Modulationsquelle durch eine optoelektronische Rückkopplung ersetzt [2]. **Bild 3** zeigt den schematischen Aufbau des Verfahrens. Rechts von der Laserdiode ist wieder der optische Resonator. Links von der Laserdiode ist die optoelektronische Rückkopplungsschleife. Das von der Rückseite der Laserdiode emittierte Laserlicht wird mittels einer schnellen Photodiode detektiert, elektrisch verstärkt und phasenangepasst zur Laserdiode zurückgekoppelt. Auch dieses Modulationsschema führt zur Modenkopplung. Das Lasersystem emittiert kurze optische Lichtimpulse mit einer der herkömmlichen Modenkopplung vergleichbaren Qualität [3].

An der Uni Hannover wurde bei Untersuchungen von J. Czarske das Potential dieses Lasersystems für die optische Metrologie erkannt [4]. Anstelle des Resonatorendspiegels wird die „technische“ Oberfläche eines Messobjektes gesetzt, die keine Oberflächenbehandlung wie ein Spiegel erhielt. Die Streuverluste an der technischen Oberfläche werden durch den hohen optischen

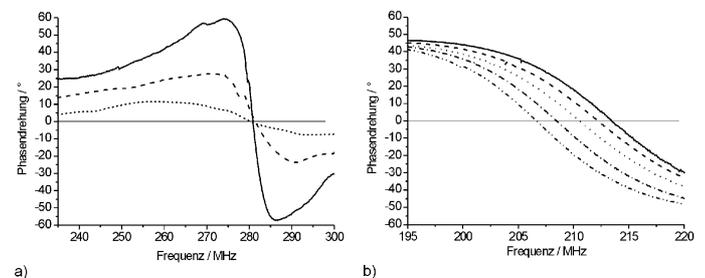


Bild 4: a) Phasengang des modengekoppelten externen Laserresonators für einen Spiegel (durchgezogene Linie), eine verzinkte Stahlplatte (gestrichelte Linie) und weißes Papier (gepunktete Linie). b) Phasengang des modengekoppelten externen Laserresonators für die Verschiebung einer technischen Oberfläche (10 mm, 5mm, 0mm, -5mm, -10 mm).

Gewinn der entspiegelten Laserdiode kompensiert, so dass sich ein stabiler Laserbetrieb mit der Ausbildung von longitudinalen Moden einstellt. Aus der in Gl. (1.1) angegebenen Proportionalität von Δf zur geometrischen Länge L des externen Resonators kann unmittelbar der Abstand zwischen Laserdiode und technischer Oberfläche bestimmt werden. Der Nulldurchgang in der Phasenübertragungsfunktion wird als Regelkriterium für einen elektrischen Regelkreis auf Basis eines Phasenregelkreises (Phase-Locked-Loop, PLL) verwendet. Hierdurch lässt sich ein automatisch messender Sensor realisieren der sehr schnell auf die Resonanzfrequenz einrastet, so dass Messungen mit hoher Datenrate ermöglicht werden.

Die Bezeichnung Mode Locking External Cavity Laser Sensor (MoLECL) spiegelt die physikalische Grundidee des Verfahrens wider.

Das Verfahren wurde im Laserzentrum Hannover für verschiedene technische Oberflächen getestet [5]. **Bild 4a** zeigt den gemessenen Phasengang für einen Spiegel, eine verzinkte Metalloberfläche und Papier als Resonatorendspiegel. Die Ergebnisse zeigen für alle drei Spiegelflächen eine nutzbare Phaseninformation, den Nulldurchgang, für die Anwendung des MoLECL Verfahrens. **Bild 4b** zeigt den gemessenen Phasengang für drei unterschiedliche Resonatorlängen. Man erkennt deutlich die Verschiebung der Resonanz, des Nulldurchgangs, mit der Variation der Resonatorlänge. Das Verfahren ist im Vergleich mit anderen Messverfahren sehr schnell. So werden derzeit nur 100 μ s benötigt, um nach einer Abstandsänderung den neuen Abstandswert bestimmen zu können. Für einen Spiegelresonator konnte schon die gewünschten Auflösung von besser als 1 μ m erzielt werden [6].

Um für technische Oberflächen Messgenauigkeiten unterhalb von

1 μm zu erzielen, ist es notwendig, die nichtlinearen Eigenschaften der Laserdiode mit zu berücksichtigen. Die formale Beschreibung basiert auf dem Ratenleichungssystem, welches von R. Lang und K. Kobayashi 1980 veröffentlicht wurde [7]. Mit Hilfe des Ratenleichungssystems in der Normierung und Schreibweise von Sacher [8] kann der Beitrag der Nichtlinearität des Lasermaterials parametrisiert werden. Es ergibt sich lineares Differentialgleichungssystem für die Änderung der Amplituden der Feldstärke $\delta E(t)$, der Änderung des Phasengangs $\delta\phi(t)$, sowie der Änderung Amplitude der Ladungsträgerdichte $\delta N(t)$.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \delta E(t) \\ \delta\phi(t) \\ \delta N(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\kappa_c \Delta E & -\kappa_s \Delta\phi E_0 & \frac{\Omega_0^2}{2\Gamma_\kappa E_0} \\ \kappa_s \Delta E & -\kappa_c \Delta\phi & -\frac{1}{2} \alpha \frac{dg}{dN} \\ -2\Gamma_\kappa E_0 & 0 & -\Gamma_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta E(t) \\ \delta\phi(t) \\ \delta N(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ J_m(t) \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

$$\Delta E = 1 - \frac{\partial E(t-\tau)}{\partial E(t)}, \Delta\phi = 1 - \frac{\partial\phi(t-\tau)}{\partial\phi(t)} \quad (1.3)$$

$$\kappa_c = \kappa \cos(\omega_0 \tau), \kappa_s = \kappa \sin(\omega_0 \tau) \quad (1.4)$$

$$\Gamma_\kappa = \Gamma - 2\kappa_c, \Omega_0^2 = \Gamma_\kappa \frac{dg}{dN} E_0^2 \quad (1.5)$$

Die Bedeutung der Größen in Gl. (1.2) ... (1.5) sind:

- $E(t)$: Amplitude der elektrischen Feldstärke des Laserlichts
- $\delta E(t)$: Auslenkung der Amplitude der elektrischen Feldstärke von der stabilen Lösung
- $\phi(t)$: Phase der elektrischen Feldstärke des Laserlichts
- $\delta\phi(t)$: Auslenkung der Phase der elektrischen Feldstärke von der stabilen Lösung
- $\Delta(t)$: Phasenverschiebung des durch den externen Resonator zurückgekoppelten Lichts
- $N(t)$: Ladungsträgerdichte in der aktiven Zone der Laserdiode
- $dN(t)$: Auslenkung der Ladungsträgerdichte in der aktiven Zone der Laserdiode von der stabilen Lösung
- dg/dN : differentieller Gewinn
- N_{th} : Schwellwert der Ladungsträgerdichte
- Γ : Photonenerfallsrate
- κ : Rückkopplungsrate durch den externen Resonatorspiegel R_3
- α : Linienverbreiterungsfaktor (Henry's Linewidth Enhancement Parameter)
- J : Pumpstärke
- γ : Ladungsträgererfallsrate

Ohne Rückkopplung ($\kappa = 0$) ergibt sich aus Gl. (1.2) - (1.5) wieder die Beschreibung der gewöhnlichen Laserdiode mit Strommodulation. Im Rückkopplungsfall kann die Beschreibungsweise genutzt werden, um mit den Methoden der linearen Algebra einen geschlossenen Ausdruck zu erstellen, mit dem sich das Modulationsverhalten direkt ohne numerische Lösung einer Differentialgleichung darstellen lässt. Damit ist ein wertvolles Hilfsmittel für die Fehlerkorrektur gewonnen.

Bild 5 zeigt eine Darstellung der aus Gl. (1.2) - (1.5) resultierenden Modulationsantwortfunktion der Laserleistung. Aufgetragen sind die Laserleistung gegen die Modulationsfrequenz für verschiedene Werte der Rückkopplungsstärke κ . Bei 100 MHz Modulationsfrequenz erkennt man die Resonanz des Externen-Resonator-Lasers, die der Resonatorumlaufzeit Δf entspricht. Die berechnete Doppelstruktur stimmt mit den Messergebnissen überein. Für zunehmende Werte der Rückkopplungsstärke κ verschwindet

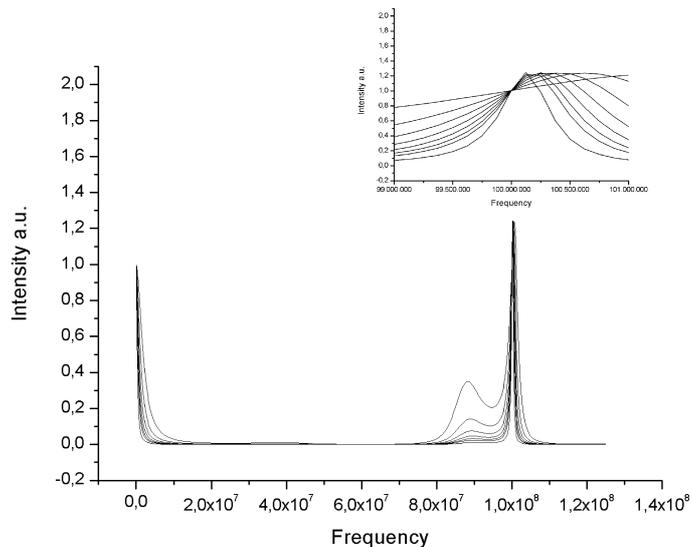


Bild 5: Analytische Berechnung des Amplitudengangs bei einer Resonatorlänge entsprechend 100 MHz. Die einzelnen Kurven stellen die Variation der Modulationsantwort für unterschiedliche Rückkopplungsstärken κ durch den Resonator dar. Das obere Teilbild ist eine Vergrößerung der Resonatorresonanz bei 100 MHz.

der Ausläufer links von der Resonatorumlaufzeit Δf . Weiterhin findet man eine systematische Abweichung der Resonanz von der Resonatorumlaufzeit Δf zu höheren Frequenzwerten, vgl. hierzu den oberen Einsatz in Bild 5. Mit Hilfe dieser Simulationsrechnungen ist eine Korrektur des systematischen Fehlers möglich.

Der derzeit realisierte MoLECL Sensor ist in **Bild 6** dargestellt. Man erkennt im Vordergrund der Platine die eingesetzte Laserdiode. Weiterhin erkennbar ist das extrem kompakte Design des MoLECL Messkopfes. Das Projekt hat inzwischen einen Status erreicht, in dem die beteiligten Arbeitsgruppen bei Sacher Lasertechnik, Laserzentrum Hannover und TEM Messtechnik den Kontakt zu industriellen Anwendern suchen, um Erfahrungen in industriellen Umgebungen sammeln zu können. Es ist geplant, den MoLECL-Sensor innerhalb der nächsten 2 Jahre für Anwendungen zur Verfügung zu stellen.

4 Zusammenfassung

Es wurde ein neues hochgenaues Sensorkonzept für die Metrologie vorgestellt. Das MoLECL-Messverfahren besitzt gegenüber her-

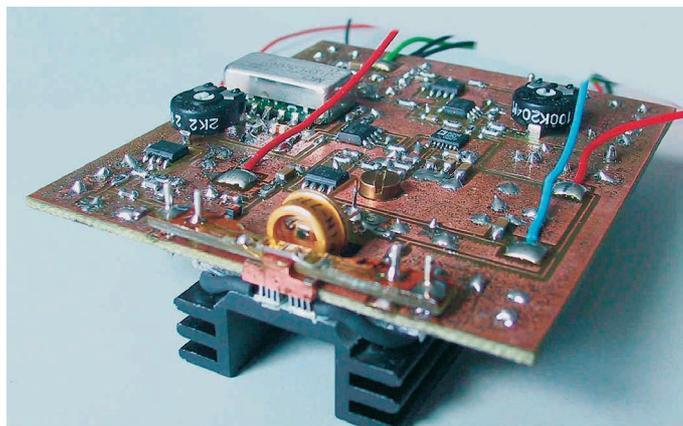


Bild 6: Realisierung des MoLECL Sensors im Laserzentrum Hannover

kömmlichen Verfahren den Vorzug, dass damit kollineare Messanordnungen realisiert werden können. Das Verfahren ist hochgenau mit einer Auflösung von besser als 1 μm und zeichnet sich durch eine sehr schnelle Antwortzeit von kleiner als 100 μs aus.

Danksagung

Wir danken den BMBF für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des MoLECL Verbundes, FK 13N8316, 13N8317, 13N8318.

Literaturhinweise:

- [1] P.-T. Ho, L.A. Glasser, E.P. Ippen, H.A. Haus, *Bandwidth-limited picosecond pulses from an actively mode-locked GaAlAs diode laser*, Appl. Phys. Lett. 33, 241, 1978
- [1] R. Nietzke, J. Sacher, W. Elsäßer, *Mode-locking of a semiconductor diode laser by self-synchronizing optoelectronic feedback of the longitudinal mode beats*, Electron. Lett. 26, 1016, 1990
- [3] M. O. Ziegler, M. Hofmann, J. Sacher, W. Elsäßer, E. O. Göbel, *Phase and amplitude stability of an external cavity diode modulated by optoelectronic feedback*, Electron. Lett. 31, 371-372, 1995
- [4] Liu, Xiongfei, *Untersuchung eines neuartigen Abstandsmeßverfahrens, basierend auf der Bestimmung von Laserpulswiederholungsfrequenzen*, Fortschrittberichte VDI, Düsseldorf 1996, Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 566, ISBN 3-18-356608-7
- [5] K. Moldenhauer, J. Möbius, T. Razik, J. Czarske, W. Ertmer, *Mikro-Laserdiodensensor unter Nutzung eines modengekoppelten externen Resonators für die industrielle Fertigungsmesstechnik*, InnovationsForum Photonik, Kaiserpfalz Goslar, 13.5.2003
- [6] J. Möbius, T. Razik, J. Czarske, J. Sacher, T. Müller-Wirts, *Interferometrischer Abstandssensor für die absolute Distanzmessung mit einem modengekoppelten Halbleiterlaser im externen Resonator*, 104. Tagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO), 10.-14. Juni 2003, Münster

- [7] -R. Lang, K. Kobayashi, *External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties*, IEEE J. Quantum Electron., QE-16, 347, 1980.
- [8] J. Sacher, D. Baums, P. Panknin, W. Elsäßer, E. O. Göbel, *Intensity instabilities of semiconductor lasers under current modulation, external light injection, and delayed feedback*, Phys. Rev. A45, 1893-1905, 1992

Ansprechpartner:

Jasper Möbius
Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
D-30419 Hannover
Tel. 0511/2788-276
Fax 0511/2788-100
eMail: jm@lzh.de
Internet: www.lzh.de



Dr. Joachim R. Sacher
Sacher Lasertechnik GmbH
Hannah Arendt Str. 3-7
D-35037 Marburg / Lahn
Tel. 06421/305-0
Fax 06421/305-299
eMail: contact@sacher.de
Internet: www.sacher.de



Dr. Thomas Müller-Wirts
TEM Messtechnik GmbH
Großer Hillen 38, D-30559 Hannover
Tel. 0511/510896-31
Fax 0511/510896-38
eMail: thomas.mueller-wirts@tem-messtechnik.de
Internet: www.tem-messtechnik.de



ANZEIGE/N