

# MIXSEL: Pikosekunden-Halbleiterscheibenlaser mit integriertem sättigbarem Absorber

Valentin J. Wittwer, Mario Mangold, Martin Hoffmann, Oliver D. Sieber, Matthias Golling, Thomas Südmeyer, Ursula Keller, ETH Zürich, Schweiz

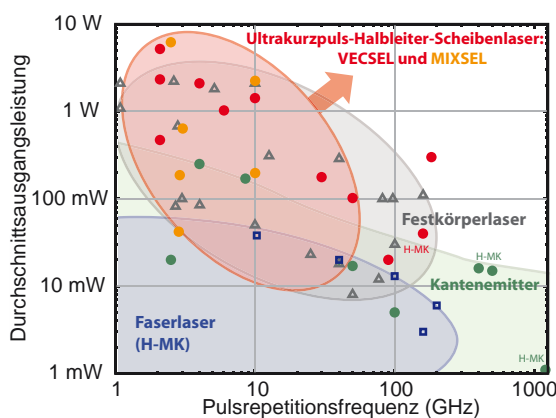
**Ein MIXSEL (Modelocked Integrated eXternal-cavity Surface Emitting Laser) ist ein besonders kompakter Ultrakurzpuls-Halbleiterscheibenlaser. Das Konzept basiert auf dem VECSEL, einem optisch gepumpten Halbleiterscheibenlaser mit externem Resonator, weiter vereinfacht durch monolithische Integration des sättigbaren Halbleiter-Absorberspiegels (SESAM) zur Modenkopplung. Zusammen mit einem externen Auskoppelspiegel erreicht die lineare Laserkavität GHz-Pulsrepetitionraten und Pikosekunden-Pulsdauern bei exzellenter Strahlqualität und dem Potential für kostengünstige industrielle Massenproduktion. Im folgendem Artikel wird die Entwicklung hin zu MIXSELn mit hoher Durchschnittsleistung beschrieben.**

## 1 Einleitung

Für eine Vielzahl von Einsatzbereichen wie Multimedia, Biomedizin und Metrologie sind kompakte und gepulste Laser erforderlich. In diesen häufig sehr spezialisierten Anwendungen kommt es vor allem auf günstige Laserquellen an, die außerdem an den Aufgabenbereich angepasst sein müssen. Kostengünstige Ultrakurzpuls-Halbleiterscheibenlaser, die auf Kantenemittern basieren, leiden unter Einschränkungen in der Ausgangsleistung und Strahlqualität. Optisch gepumpte Halbleiterscheibenlaser mit einem externen Resonator (Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser – VECSEL [1]) können hingegen durch passive Modenkopplung mit einem sättigbaren Halbleiter-Absorberspiegel (SEmiconductor Saturable Absorber Mirror – SESAM [2,3]) ultrakurze Pulse mit Durchschnittsleistungen von mehreren Watt bei exzellenter Strahlqualität erzeugen (Bild 1) [4,5].

In diesem Artikel beschreiben wir das Konzept des MIXSELs (Modelocked Integrated eXternal-cavity Surface-Emitting Laser [6]), durch das die Komplexität solcher Ultrakurzpuls-Halbleiterscheibenlaser weiter verringert wird, indem der sättigbare Absorber direkt in die Halbleiter-Verstärkerstruktur integriert wird. Die konzeptionellen Vorteile des MIXSELs machen diese Technologie zu einer idealen Plattform u.a. für Taktung und Kurzstanzkommunikation in Mehrkerncomputerprozessoren, RGB-Erzeugung im Multimedia-Bereich, Mehrphotonen-Anwendungen in der Biomedizin, oder für optische Zeitmes-

sung und Spektroskopie im Bereich der Metrologie. Dies wird ermöglicht durch eine enorme Wellenlängenflexibilität des Halbleitermaterials, welches Pulsbetrieb bei nahezu frei wählbarer Wellenlänge zulässt. Einer der Hauptvorteile der MIXSEL-Technologie ist das Potential für eine kostengünstige Herstellung der Laser, das intrinsisch auf Massenproduktion ausgelegt werden kann. Ferner ermöglicht die Kompaktheit des Resonators und die einfache Möglichkeit eines monolithischen Aufbaus [7,8] eine weitere Reduktion der Produktionskosten, vergleichbar mit Kantenemittern. Im Gegensatz zu diesen ist die MIXSEL-Technologie allerdings Leistungs-skalierbar und ermöglicht somit eine hohe Ausgangsleistung und gute Strahlqualität in gepulstem Betrieb. In Abschnitt 2 wird der Aufbau eines MIXSELs



**Bild 1: Übersicht über die Ausgangsleistung von MIXSELn und VECSELn im Vergleich zu anderen gepulsten Lasersystemen im Gigahertzbereich (H-MK: Harmonische Modenkopplung)**

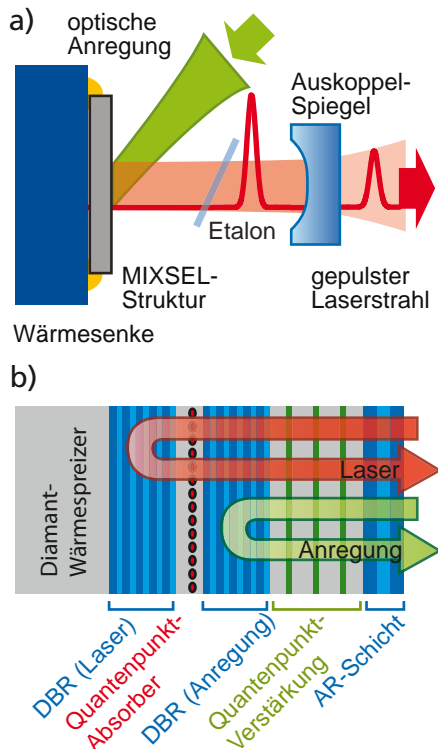
im Detail beschrieben, dabei wird auch auf die größten Schwierigkeiten bei dessen Realisierung eingegangen. Die Abschnitte 3 und 4 behandeln verschiedene Resultate und geben einen Ausblick auf Verbesserungsmöglichkeiten dieser neuartigen Technologie.

## 2 Das MIXSEL-Konzept: Design und Wachstum der Halbleiterstruktur

Im Gegensatz zu einem SESAM-modengekoppelten VECSEL benötigt man für einen MIXSEL-Resonator nur eine einzige Halbleiterstruktur, welche die Verstärkungsregion und den sättigbaren Absorber beinhaltet [6]. Durch diese Integration ist es möglich, einen Ultrakurzpuls-Laser zu entwickeln, der als einziges weiteres Resonator-Element einen Auskoppelspiegel benötigt. Dieser einfache lineare optische Resonator (Bild 2a) erlaubt sehr kurze Resonatorlängen für Puls wiederholraten von mehreren zehn Gigahertz. Die MIXSEL-Strukturen werden mit Hilfe von Molekularstrahlepitaxie (Molecular Beam Epitaxy, MBE) auf ein Substrat aus Galliumarsenid (GaAs) gewachsen (Bild 2b). Zuerst wird ein Bragg-Spiegel (Distributed Bragg Reflector, DBR) für die Laseremissionswellenlänge um ca. 960 nm gewachsen, der durch typischerweise 30 Paare verschiedener Halbleiterschichten mit abwechselnd hohem und niedrigem Brechungsindex mehr als 99,9% des Lichts bei dieser Wellenlänge reflektiert. Darauf folgt der

sättigbare Absorber, welcher aus einer Schicht Indium-Arsenid (InAs) Quantenpunkten (Quantum Dots, QDs) besteht [9]. Im Anschluss wird ein weiterer DBR für die Anregungswellenlänge gewachsen, um eine Vorsättigung des Absorbers durch das Anregungslicht zu vermeiden und die Anregungseffizienz in der angrenzenden Verstärkungsregion zu erhöhen. Diese besteht analog zu VECSEL-Strukturen in diesem Wellenlängenbereich aus Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs) Quantentöpfen (Quantum Wells, QWs).

In den bisherigen MIXSEL-Strukturen waren sieben dieser QWs in GaAs-Schichten eingebettet. In diesen GaAs-Schichten wird der größte Teil des Anregungslichts absorbiert, die dadurch



**Bild 2: Schematischer Aufbau eines MIXSELS: a) Resonator bestehend aus MIXSEL-Struktur und Auskoppelspiegel und seitlicher optischer Anregung; b) Schematische Seitenansicht der Schichtabfolge einer MIXSEL-Struktur**

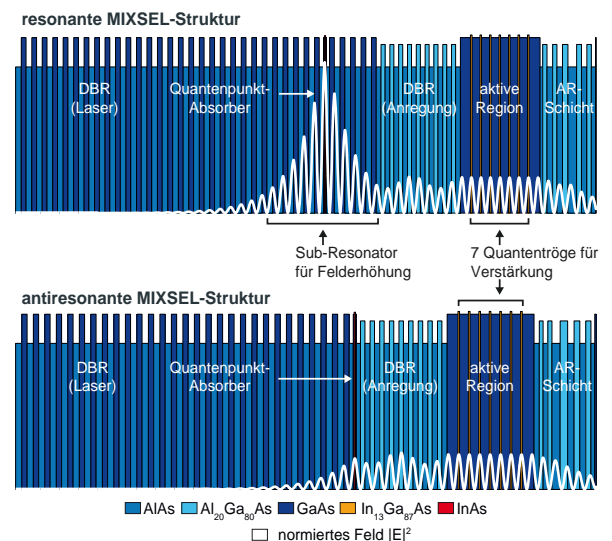
entstandenen Ladungsträger werden dann in die QWs transferiert. Als letzter Teil der Struktur wird nach der aktiven Region eine mehrschichtige Anti-Reflexions-Schicht (AR-Schicht) gewachsen, welche die Reflexionsverluste des Laser- und Anregungslichts an der Grenzschicht zur Luft minimiert. Für passive Modenkopplung muss der sättigbare Absorber bei niedrigeren Intensitäten sättigen als das Verstärkungsmedium. Dies ist nötig um eine Netto-Verstärkung des Laserpulses im Resonator zu erreichen [10]. Während die Intensitäten in einem modengekoppelten VECSEL durch die Resonatorgeometrie in der Verstärkerregion und dem Absorber unabhängig voneinander angepasst werden können, sind sie im MIXSEL identisch. Deshalb wurde in den ersten MIXSEL-Strukturen ein Sub-Resonator eingebettet (**Bild 3 oben**), um an der Stelle des Absorbers eine Erhöhung des elektrischen Feldes im Vergleich zur Verstärkungsregion zu erreichen. Das sogenannte resonante Prinzip reagiert allerdings sehr empfindlich auf Ungenauigkeiten in den Schichtdicken der Struktur. Um diese Anfälligkeit auf Wachstumsfehler zu minimieren, wurde im nächsten Schritt eine Struktur nach dem antiresonanten Prinzip (**Bild 3 unten**) entwickelt. Der Verzicht

auf den Sub-Resonator in der Struktur verlangt allerdings nach veränderten Parametern des QD-Absorbers. Diese sind stark abhängig von den Wachstumsbedingungen und der Behandlung nach deren Wachstum, z.B. durch Ausheizen (englisch: annealing). In einer Studie wurden die QD-Absorber so weit verbessert, dass sie in die neuen Strukturen eingebettet werden können [9]. Besonderes Augenmerk liegt dabei auch auf der Rekombination der Absorption nach der Sättigung durch einen kurzen Laserpuls, die im Zeitbereich zwischen einer bis zu mehreren zehn Pikosekunden liegt. Stabile Modenkopplung kann einfacher erreicht werden, wenn die Rekombination schneller erfolgt als ein Umlauf des Pulses im Resonator. Im Betrieb wird die MIXSEL-Struktur von einem kommerziellen Diodenlaser bei einer Wellenlänge von 808 nm unter einem Einfallswinkel von 45 Grad angeregt. Für den Betrieb mit hohen Ausgangsleistungen wird eine hohe Anregungsleistung benötigt, welche eine starke Wärmeentwicklung in der Struktur hervorruft. Um die thermische Belastung zu minimieren, wurde bei aktuellen Strukturen die Wachstumsreihenfolge der Halbleiterschichten umgekehrt und der Halbleiterschicht auf einen metallisierten Diamanten mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit kontaktiert (englisch: flip-chip bonding). Nach nasschemischer Entfernung des GaAs-Substrats bleibt nur die eigentliche Struktur mit einer Dicke von wenigen Mikrometern auf dem Diamanten zurück. Mit dieser Methode wird eine nahezu eindimensionale Wärmeleitung in der Halbleiterstruktur erreicht, und die Wärme wird äußerst effizient aus der Verstärkungsregion abgeführt. Dieses Prinzip ermöglicht Leistungsskalierung durch die Vergrößerung der Lasermode auf der Struktur bis zu mehreren hundert Mikrometern im Durchmesser. Dies erhöht die Ausgangsleistung in den Watt-Bereich bei gleichbleibender Intensität in der Struktur unter Beibehaltung einer exzellenten Strahlqualität.

### 3 Resultate

Die erste experimentelle Realisierung des MIXSELS im Jahr 2007 bestätigte die Machbarkeit der Absorber-Integration in die Halbleiterverstärkungsstruktur eines VECSELS. Allerdings war die Ausgangsleistung mit 40 mW bei einer Pulsdauer von 35 ps

und einer Pulsrepetitionrate von rund 3 GHz noch nicht vergleichbar mit den Leistungsdaten modengekoppelter VECSEL [4,6]. Nur durch starke Kühlung der Struktur auf  $-50^{\circ}\text{C}$  konnte die Ausgangsleistung auf 185 mW bei einer Pulsdauer von 31,6 ps verbessert werden [7]. Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, konnte mit dem angepassten QD-Absorber eine antiresonante Struktur (**Bild 3 unten**) entwickelt und auf einen Diamanten kontaktiert werden. Dadurch konnten zwei wichtige Meilensteine auf dem Weg zum Hochleistungs-Ultrakurzpulslaser auf Halbleiterbasis gesetzt werden. Bei einer Anregungsleistung von 36 W konnte selbst-startende und stabile fundamentale Modenkopplung bei einer durchschnittlichen Ausgangsleistung von 6,4 W und einer Pulsrepetitionrate von 2,5 GHz erzielt werden. Gleichzeitig wurde eine Pulsdauer von 28 ps erreicht. Diese Laserkonfiguration (**Bild 4**) erreicht die bisher höchste durchschnittliche Ausgangsleistung aller Ultrakurzpuls-Halbleiterlaser [11].

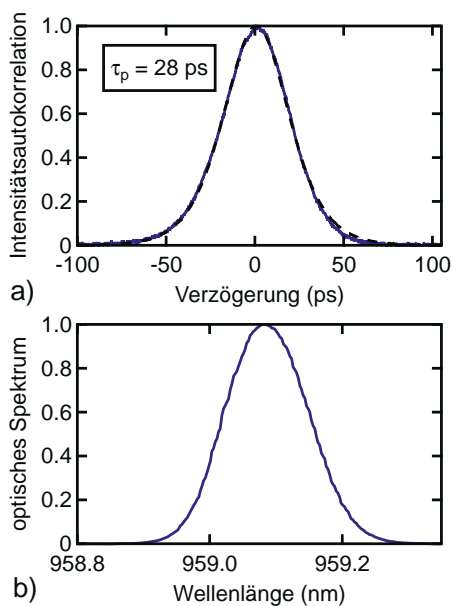


**Bild 3: MIXSEL-Schichtaufbau oben resonantes Prinzip mit Sub-Resonator für Felderhöhung im Quantenpunkt-Absorber; unten antiresonantes Prinzip ohne Sub-Resonator mit angepassten Eigenschaften des Quantenpunkt-Absorbers**

Mit derselben Struktur konnte die Puls wiederholrate durch einen auf 15 mm verkürzten Resonator auf 10 GHz gesteigert werden. In dieser Anordnung wurde eine Ausgangsleistung von 2,4 W mit einer Pulsdauer von 17 ps erreicht. Dies ist die höchste Ausgangsleistung eines Ultrakurzpuls-Halbleiterlasers mit 10 GHz Puls wiederholrate [12].

### 4 Fazit und Ausblick

Das Konzept des MIXSELS ist bestens geeignet, um Ultrakurzpulslaser mit sehr hohen Ausgangsleistungen auf Halbleiterbasis



**Bild 4: Charakterisierung der Laserpulse bei 6,4 W Ausgangsleistung: a) Intensitätsautokorrelation der Pulse mit einer Dauer von 28 ps; b) Optisches Spektrum, zentriert um eine Wellenlänge von 959,1 nm**

zu entwickeln. Der sehr kompakte Resonatoraufbau erlaubt die Erzeugung von Laserpulsen mit Repetitionsraten im Multi-Gigahertz-Bereich.

Ein wichtiger nächster Schritt ist die Erzeugung noch kürzerer Laserpulse unter Beibehaltung der hohen Ausgangsleistung. Ähnliche Strategien, die bereits die VECSEL-Technologie in den Femtosekundenpuls-Bereich geführt haben, sollen auch beim MIXSEL ihre Anwendung finden. So ist es essentiell, den sättigbaren Absorber auf schnelle Rekombination hin zu optimieren. Dies konnte mit einem neu entwickelten Absorber auf der Basis von InGaAs-Quantentöpfen erzielt werden.

Weiterhin wurde die AR-Schicht optimiert, um die Dispersion zweiter Ordnung um die Laseremissionswellenlänge flach und leicht positiv zu gestalten [5,13]. Mit Hilfe dieser Schritte konnte die Pulsdauer auf 4,8 ps gesenkt werden. Die schnelle Rekombination des Absorbers erlaubte auch eine Steigerung der Pulsrepetitionsrate auf 20 GHz [14]. Diese beiden Resultate wurden mit einer MIXSEL-Struktur ohne Wärmeleitungs-optimierung erreicht und können mit einer neuen Struktur bald im Bereich hoher Ausgangsleistungen wiederholt werden.

## Danksgiving

Die Forschung, die zu diesen Ergebnissen geführt hat, wurde teilfinanziert vom Programm der Schweizerischen Eidgenos-

schaft "Nano-Tera.ch", welches wissenschaftlich vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNFS) evaluiert wurde.

## Literaturhinweise:

- [1] M. Kuznetsov, F. Hakimi, R. Sprague, A. Mooradian, High-Power (>0.5-W CW) Diode-Pumped Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Semiconductor Lasers with Circular TEM<sub>00</sub> Beams, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 9, 1063-1065 (1997)
- [2] U. Keller, K.J. Weingarten, F.X. Kärtner, D. Kopf, B. Braun, I.D. Jung, R. Fluck, C. Hönninger, N. Matuschek, J. Aus der Au, Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2, 435-453 (1996)
- [3] U. Keller, Sättigbare Halbleiter-Absorberspiegel für ultraschnelle Festkörperlaser, *Photonik* 4, 44-47 (2004)
- [4] U. Keller, A.C. Tropper, Passively modelocked surface-emitting semiconductor lasers, *Phys. Rep.* 429, 67-120 (2006)
- [5] O.D. Sieber, M. Hoffmann, V.J. Wittwer, M. Mangold, M. Golling, T. Südmeyer, U. Keller, *Multi-Gigahertz Femtosekunden-Halbleiterscheibenlaser mit hoher Durchschnittsleistung*, *Photonik* 4, 32-35 (2012)
- [6] D.J.H.C. Maas, A.-R. Bellancourt, B. Rudin, M. Golling, H.J. Unold, T. Südmeyer, U. Keller, *Vertical integration of ultrafast semiconductor lasers*, *Appl. Phys. B* 88, 493-497 (2007)
- [7] A.-R. Bellancourt, D.J.H.C. Maas, B. Rudin, M. Golling, T. Südmeyer, U. Keller, *Modelocked Integrated External-Cavity Surface Emitting Laser (MIXSEL)*, *IET Optoelectronics* Vol. 3, pp. 61-72 (2009)
- [8] N. Laurand, C.L. Lee, E. Gu, J.E. Hastie, S. Calvez, M.D. Dawson, *Micro lensed microchip VECSEL*, *Opt. Express* 15, 9341-9346 (2007)
- [9] D.J.H.C. Maas, A.R. Bellancourt, M. Hoffmann, B. Rudin, Y. Barbarin, M. Golling, T. Südmeyer, U. Keller, *Growth parameter optimization for fast quantum dot SESAMs*, *Opt. Express* 16, 18646-18656 (2008)
- [10] U. Keller, *Ultrafast solid-state lasers*, in Landolt-Börnstein, *Laser Physics and Applications. Subvolume B: Laser Systems. Part I*, (Hrsg. G. Herziger, H. Weber, R. Proprawe), Springer Verlag, Heidelberg, 2007, pp. 33-167
- [11] B. Rudin, V.J. Wittwer, D.J.H.C. Maas, M. Hoffmann, O.D. Sieber, Y. Barbarin, M. Golling, T. Südmeyer, U. Keller, *High-power MIXSEL: an integrated ultrafast semiconductor laser with 6.4 W average power*, *Opt. Express* 18, 27582-27588 (2010)
- [12] V.J. Wittwer, M. Mangold, M. Hoffmann, O.D. Sieber, M. Golling, T. Südmeyer, U. Keller, *High-power integrated ultrafast semiconductor disk laser: multi-watt 10-GHz pulse generation*, accepted for publication in *Electronics letters* 48 (2012)
- [13] M. Hoffmann, O.D. Sieber, D.J.H.C. Maas, V.J. Wittwer, M. Golling, T. Südmeyer, U. Keller, *Experimental verification of soliton-like pulse-shaping mechanisms in passively mode-locked VECSELS*, *Opt. Express* 18, 10143-10153 (2010)
- [14] V.J. Wittwer, O.D. Sieber, M. Mangold, M. Hoffmann, C.J. Saraceno, M. Golling, B.W. Tilma, T. Südmeyer, U. Keller, *First MIXSEL with a Quantum Well Saturable Absorber: Shorter Pulse Durations and Higher Repetition Rates*, in *CLEO US 2012*, paper CW1N.2 (OSA, 2012)

## Ansprechpartner:

Valentin Johannes Wittwer  
ETH Zürich  
Institut für Quantenelektronik  
Ultrafast Laser Physics  
Wolfgang-Pauli-Str. 16  
8093 Zürich  
Schweiz  
Tel. +41/44/633-4061  
Fax +41/44/633-1059  
eMail: [vwittwer@phys.ethz.ch](mailto:vwittwer@phys.ethz.ch)  
Internet: [www.ulp.ethz.ch](http://www.ulp.ethz.ch)



Mario Mangold  
Tel. +41/44/633-7136  
eMail: [mangoldm@phys.ethz.ch](mailto:mangoldm@phys.ethz.ch)



Dr. Martin Hoffmann  
eMail: [mh@phys.ethz.ch](mailto:mh@phys.ethz.ch)



Oliver Dominik Sieber  
Tel. +41/44/633-9146  
eMail: [siebero@phys.ethz.ch](mailto:siebero@phys.ethz.ch)



Dr. Matthias Golling  
Tel. +41/44/633-4489  
eMail: [golling@phys.ethz.ch](mailto:golling@phys.ethz.ch)



Prof. Thomas Südmeyer  
eMail: [sudmeyer@phys.ethz.ch](mailto:sudmeyer@phys.ethz.ch)



Prof. Ursula Keller  
Tel. +41/44/633-2146  
eMail: [keller@phys.ethz.ch](mailto:keller@phys.ethz.ch)

