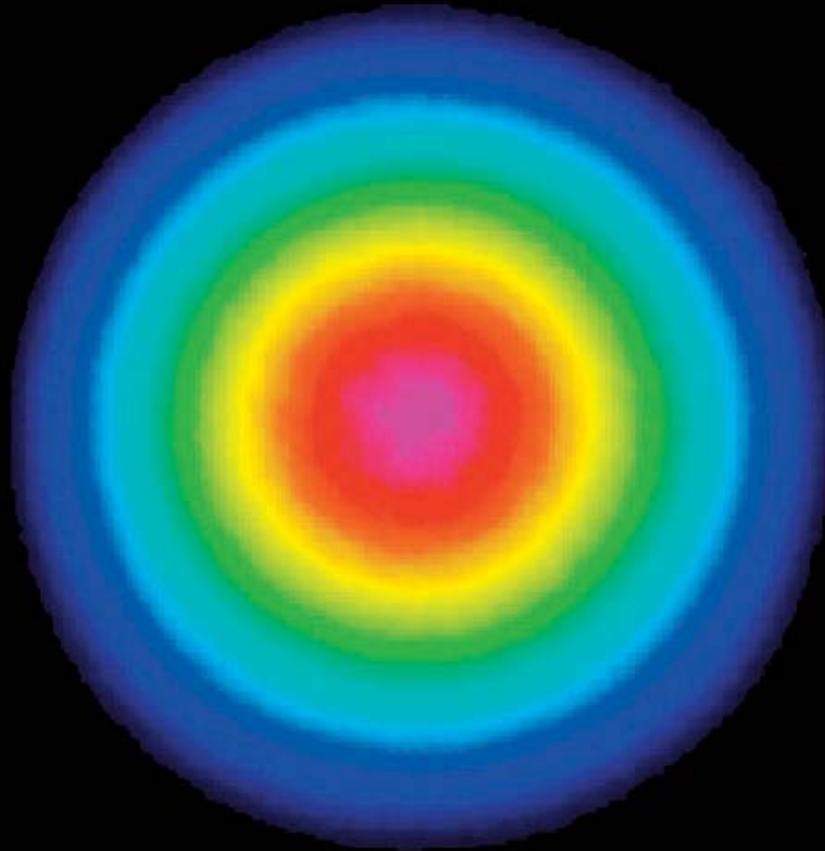


Louis McDonagh



**888 nm pumping of Nd:YVO₄
for high-power TEM₀₀ lasers**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

**888 nm pumping of Nd:YVO₄
for high-power TEM₀₀ lasers**

Dissertation

Louis McDonagh

Vom Fachbereich Physik der Technischen Universität Kaiserslautern zur Verleihung
des akademischen Grades „Doktor der Naturwissenschaften“ genehmigte Dissertation

Betreuer: Prof. Dr. Richard Wallenstein

Zweitgutachter: Prof. Dr. René Beigang

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 09.07.2008

D 386

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2011

Zgl.: (TU) Kaiserslautern (Univ.), 2008

978-3-86955-028-2

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2011

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-028-2

Chaque année il y a un champion.

Arthémon Hatungimana

To Chris

Abstract

888 nm pumping of Nd:YVO₄ for high power TEM₀₀ lasers

For the last decade, neodymium-doped orthovanadate has established itself as the active material of choice for commercial solid-state lasers emitting in the 1 μm range, with output powers from several hundred milliwatts to a few tens of watts, in continuous-wave, short nanosecond Q-switched, or picosecond modelocked pulsed regimes. Its main advantages over other Nd-doped hosts such as YAG are a large stimulated-emission cross section leading to a high gain, a strong pump absorption allowing the efficient mode-matching of tightly-focused pump light, and a natural birefringence resulting in a continuously polarized output. The main drawbacks, however, are rather poor mechanical characteristics and strong thermal lensing, effectively limiting the maximum applicable pump power before excessively strong and aberrated thermal lensing prevents an efficient operation in a diffraction-limited beam, and ultimately the crystal's fracture. Put aside the power limitation, the association of vanadate with diode end pumping allows for the realization of highly efficient and reliable laser sources based on well-known technologies, which provides an advantage in terms of manufacturability and cost-effectiveness over other high-potential technologies such as disks and fibers.

This thesis introduces a novel pumping technique for Nd:YVO₄ that allows for the realization of significantly higher-power laser sources with a high optical-to-optical efficiency and diffraction-limited beam quality, while keeping the benefits of a well-established technology. It consists in pumping at a wavelength of 888 nm instead of the classic 808 nm, providing a low and isotropic absorption, which results in a smooth distribution of the absorbed pump light in long crystals, effectively limiting the deleterious effects of high inversion density such as crystal end-facet bulging, high crystal temperature, aberrated thermal lensing, and upconversion. After presenting vanadate's spectroscopic and physical characteristics, a complete analysis of the heat-generating effects is performed, allowing for side-by-side simulations of the thermal effects in practical 808 nm and 888 nm pumped systems, and for an evaluation of their respective thermal lensing behaviors.

Continuous-wave operation was thoroughly investigated, first in a multi-transversal mode oscillator to assess the maximum optical efficiency with optimum pump-mode matching and the thermal lensing characteristics. A TEM₀₀ resonator was then developed with a single crystal and one pump diode, providing 60 W of output power with an optical efficiency of 55% and a beam quality of $M^2 = 1.05$. This resonator was symmetrically replicated to form a periodic resonator, providing 120 W of output with the same optical efficiency and beam quality. This two-crystal configuration was then modified to an oscillator-amplifier configuration, providing a single-pass extraction efficiency of 53% and a total oscillator-amplifier output of 117 W without any beam-quality degradation. Intracavity doubling of the one and two-crystal configurations was achieved by inserting a non-critically phase-matched LiB₅O₃ (LBO) non-linear crystal in the resonator, providing up to 62 W of diffraction-limited green light at 532 nm with low-noise

characteristics thanks to a large number of oscillating modes, thus limiting the effects of the “green problem”.

A strong industrial interest resides in Q-switched lasers emitting nanosecond pulses, particularly with a high average power, high pulse repetition rate, and pulse durations of a few to several tens of nanoseconds. Achieving high-frequency and short-pulse operation both require a high gain, which explains the domination of Nd:YVO₄ over lower-gain materials such as Nd:YAG or Yb:YAG. Thus, an acousto-optically Q-switched oscillator was demonstrated with 50 W output power and 28 ns pulse duration at 50 kHz. Pulse duration, however, is inversely proportional to the pulse energy, so that an increase in repetition rate inevitably results in an almost linear increase in pulse width. A cavity-dumped Q-switched oscillator was built to circumvent this limitation, the pulse length being defined by the cavity roundtrip time and the electro-optic cell switching time. It provided a constant pulse duration of 6 ns up to a repetition rate of 100 kHz and a maximum output power of 47 W. Such short pulse durations are normally available with output powers of a few watts from Q-switched lasers, and conversely Q-switched lasers of similarly high output power deliver pulses of several tens to over 100 ns in duration.

There exists another strong interest in high average power quasi-cw picosecond sources, which allow for the efficient generation of green and UV radiation, or even red-green-blue for laser video projection. Passive mode locking with a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is the preferred technique employed for the stable and self-starting generation of picosecond pulse trains, yet a high gain is necessary for achieving high repetition rates while avoiding the Q-switched mode-locking regime. Thus SESAM mode locking was applied to an 888 nm pumped oscillator, achieving 57 W of output power at a repetition-rate of 110 MHz and a pulse duration of 33 ps. Its output was efficiently amplified in a single pass up to 111 W without any beam quality, temporal, or spectral degradation. The high peak power of 30 kW allowed for the generation of 87 W of second harmonic at 532 nm with an efficiency of 80%, and 35 W of 355 nm third harmonic with a conversion efficiency of 33% in LBO crystals.

The wide range of high-power systems demonstrated in this work illustrate the benefits of the optimized pumping of Nd:YVO₄ at 888 nm, maintaining its highly-desirable characteristics such as a high gain and a polarized output while extending its power capabilities far beyond regular 808 nm pumped systems. This improvement should allow Nd:YVO₄ systems to compete with high-power technologies such as disks and fibers, which often struggle in the generation of short pulses because of their low gain and strong non-linear effects, respectively.

Kurzzusammenfassung

888 nm Pumpanregung für Hochleistung Nd:YVO₄ Laser

In den vergangenen zehn Jahren hat sich neodymdotiertes Orthovanadat als das Material der Wahl für den Einsatz in kommerziellen Festkörperlasern im Wellenlängenbereich um 1 μm bei mittleren Ausgangsleistungen von einigen hundert Milliwatt bis zu mehreren zehn Watt etabliert. Dieses Verstärkungsmedium eignet sich sowohl für die kontinuierliche Emission, als auch für die Güteschaltung im Nanosekundenbereich oder für den Betrieb im modengekoppelten Regime mit Impulsdauern im Bereich weniger Pikosekunden. Die wesentlichen Vorteile dieses Materials gegenüber anderen neodymdotierten Wirtskristallen wie beispielsweise YAG ergeben sich neben seinem großen Wirkungsquerschnitt für stimulierte Emission und der damit einhergehenden hohen Verstärkung auch aus der starken Pumplichtabsorption, die einen effizienten Überlapp zwischen der Lasermode und einem stark fokussierten Pumpstrahl ermöglicht. Darüber hinaus gewährleistet die natürliche Doppelbrechung des Kristalls eine stabile lineare Polarisierung der ausgekoppelten Strahlung. Als Nachteile sind neben den verhältnismäßig ungünstigen mechanischen Eigenschaften die Neigung zur Ausbildung thermischer Linsen anzuführen. Diese führen zu einer Begrenzung der maximalen Pumpleistung durch die damit verbundenen starken Aberrationen, welche die Emission in einem beugungsbegrenzten Strahl verhindern und letztlich auch zur Zerstörung des Kristalls führen können. Lässt man die Beschränkung der mittleren Ausgangsleistung außer Betracht, so bringt Nd:YVO₄ in Kombination mit der longitudinalen Anregung durch Diodenlaser hocheffiziente und zuverlässige Laserquellen auf der Basis wohlbeherrschter Technologien hervor und besitzt hinsichtlich Fertigbarkeit und Kosteneffizienz entscheidende Vorteile gegenüber scheiben- oder faserbasierten Lösungen.

Die vorliegende Arbeit stellt ein neues Verfahren zur Pumpanregung für Nd:YVO₄ vor, welches die Realisierung neuartiger Laserquellen mit signifikant höherer Leistung, hohem optisch zu optischem Wirkungsgrad und einer beugungsbegrenzten Strahlqualität ermöglicht, und gleichzeitig mit jenen Vorteilen verbindet, die durch die Nutzung einer etablierten Technologie entstehen. Die Besonderheit des Verfahrens liegt in der Anregungswellenlänge von 888 nm anstelle der klassischerweise verwendeten 808 nm. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil einer niedrigen und isotropen Absorption, welche in einer gleichmäßigen Verteilung des absorbierten Pumplichts in langen Kristallen resultiert und somit eine Unterdrückung schädlicher Effekte bewirkt, wie sie durch eine hohe Inversionsdichte im Verstärkungsmedium auftreten. Dies sind vor allem Wölbung der Kristallendfacetten, hohe Kristalltemperatur, Aberrationen durch thermische Linsen so wie Upconversionprozesse. Nach einer einleitenden Darstellung der spektroskopischen und physikalischen Eigenschaften von Nd:YVO₄ folgt eine umfassende Analyse der wärmeerzeugenden Effekte im Rahmen einer vergleichenden Simulation in realitätsnahen Systemen mit Anregung bei 808 nm bzw. 888 nm, deren Ergebnisse im Hinblick auf die thermische Linsenwirkung bewertet werden.

Als Ausgangspunkt der umfassenden experimentellen Charakterisierung wurde zunächst der kontinuierliche Betrieb eines Oszillators mit mehreren Transversalmoden untersucht, um die

maximale optische Effizienz bei optimalem Pumpmodenüberlapp so wie die thermische Linsenbildung zu studieren. Im Anschluß daran wurde ein TEM₀₀ Resonator entwickelt, der einen einzigen Kristall beherbergte und mit einer einzigen Pumpdiode angeregt wurde. Diese Anordnung emittierte 60 W Ausgangsleistung mit einem optischen Wirkungsgrad von 55% und einer Strahlqualität von $M^2 = 1.05$. In einem nächsten Schritt wurde dieser Resonator repliziert, um in einer symmetrischen Anordnung einen periodische Resonator zu formen, welcher 120 W Leistung mit gleich hoher optischer Effizienz und Strahlqualität erzeugte. Dieser Aufbau wurde anschließend in eine Oszillator-Verstärker-Konfiguration überführt, die im Einfachdurchgang bei gleichzeitig unvermindert hoher Strahlqualität eine Extraktionseffizienz von 52% und eine Gesamtausgangsleistung von 115 W lieferte. Schließlich wurde sowohl für die Anordnung mit einem, als auch für jene mit zwei Kristallen durch resonatorinterne Frequenzverdopplung mittels nichtkritisch angepasstem LiB₅O₃ (LBO) grüne, beugungsbegrenzte Laserstrahlung bei 532 nm mit einer Leistung von 62 W erzeugt. Die frequenzverdoppelte Strahlung erwies sich aufgrund der hohen Zahl oszillierender Resonatormoden als äußerst rauscharm, was zur wirksamen Unterdrückung des störenden “grün Problems” beitrug.

Es besteht eine starke industrielle Nachfrage für gütegeschaltete Laser mit Emission im Nanosekundenbereich, insbesondere mit den Eigenschaften hoher mittlerer Ausgangsleistung, hoher Impulswiederholrate und Impulsdauern von einigen bis zu mehreren zehn Nanosekunden. Um sowohl eine hohe Wiederholrate als auch kurze Impulse zu erzielen bedarf es einer hohen Verstärkung, wie es Nd:YVO₄ bietet und daher gegenüber anderen geringverstärkenden Materialien wie Nd:YAG oder Yb:YAG dominiert. Daher wurde ein akustooptischer, gütegeschalteter Oszillator aufgebaut, mit dem eine Ausgangsleistung von 50 W bei 28 ns Impulsdauer und einer Wiederholrate von 50 kHz demonstriert wurde. Unglücklicherweise verhält sich die Impulsdauer umgekehrt proportional zur Impulsenergie, womit ein Anstieg der Wiederholrate unweigerlich in einer nahezu linearen Zunahme der Impulslänge resultiert. Um das vorangehend beschriebene Problem zu umgehen, wurde ein gütegeschalteter Oszillator mit cavity dumping realisiert. Die Impulsdauer ist in dieser Anordnung vorrangig durch die Resonatorumlaufzeit und die Schaltzeit des elektrooptischen Modulators bestimmt. Somit konnte eine konstante Impulsdauer von 6 ns bis zu einer Wiederholrate von 100 kHz hinauf und eine maximale Ausgangsleistung von 47 W generiert werden. Derart kurze Impulse sind üblicherweise nur mit gütegeschalteten Lasern mit wenigen Watt Ausgangsleistung möglich, umgekehrt liefern gütegeschaltete Laser mit ähnlich hohen Ausgangsleistungen Impulsdauern von mehreren zehn bis über 100 ns.

Besonderes Interesse an quasi-cw Hochleistungslaserquellen im Pikosekundenbereich besteht im Hinblick auf die effiziente Frequenzkonversion, mit der sich leistungsstarke grüne oder ultraviolette Strahlung erzeugen lässt. Mit besonders geeigneten Verfahren kann sogar das Tripel Rot, Grün und Blau (RGB) für den Einsatz in Laservideoprojektoren generiert werden. Die passive Modenkopplung mit einem halbleiterbasierten sättigbaren Absorber (SESAM) ist die bevorzugte Technik zur Erzeugung stabiler, selbststartender Pikosekundenimpulszüge. Hierzu wird eine hohe Verstärkung im Lasermaterial benötigt, damit bei hohen Wiederholraten keine gütegeschaltete Modenkopplung auftritt. Aus diesem Grund wurde ein SESAM in einen Oszillator eingebracht, der bei 888 nm angeregt war und 57 W modengekoppelte Ausgangsleistung

bei 110 kHz Wiederholrate und 33 ps Impulsdauer emittierte. Die Oszillatoremission wurde anschließend im Einfachdurchgang effizient auf eine Ausgangsleistung von 111 W verstärkt, ohne dabei eine Verringerung der Strahlqualität oder der zeitlich-spektralen Eigenschaften zu beobachten. Die dabei auftretende hohe Spitzenleistung von 30 kW ermöglichte unter Verwendung von LBO als nichtlineares Medium die Generierung von 87 W auf der zweiten Harmonischen bei 532 nm mit einer Konversionseffizienz von 80%. Die Frequenzverdreifachung nach 355 nm lieferte 35 W Leistung mit einer Konversionseffizienz von 33%.

Die Vielfalt an Hochleistungslasersystemen, die im Rahmen dieser Arbeit demonstriert wurden, zeigen eindrucksvoll die Vorzüge der Anregung von Nd:YVO₄ bei einer Wellenlänge von 888 nm. Dabei bleiben wichtige Eigenschaften wie die hohe Verstärkung und der hohe Polarisationsgrad der Emission erhalten, während die erzielbaren Ausgangleistungen deutlich höher liegen als mit Systemen, die bei 808 nm gepumpt sind. Die Summe dieser günstigen Eigenschaften sollte Nd:YVO₄ das nötige Potential verleihen, mit hochleistungs Scheiben- und Faserlasern erfolgreich konkurrieren zu können, insbesondere auch deswegen, weil sich Letztere aufgrund der geringen Verstärkung und starker nichtlinearer Effekte häufig nicht zur Generierung kurzer Impulse eignen.

Publications

Journals

- L. McDonagh, A. Nebel, and R. Wallenstein, “111 W, 110 MHz repetition-rate, passively mode-locked TEM₀₀ Nd:YVO₄ master oscillator power amplifier pumped at 888 nm,” *Opt. Lett.* **32**, 1259–1261 (2007).
- L. McDonagh and R. Wallenstein, “Low-noise 62 W CW intracavity-doubled TEM₀₀ Nd:YVO₄ green laser pumped at 888nm,” *Opt. Lett.* **32**, 802–804 (2007).
- L. McDonagh, R. Wallenstein, and R. Knappe, “47 W, 6 ns constant pulse duration, high-repetition-rate cavity-dumped Q-switched TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator,” *Opt. Lett.* **31**, 3303–3305 (2006).
- L. McDonagh, R. Wallenstein, R. Knappe, and A. Nebel, “High-efficiency 60 W TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator pumped at 888 nm,” *Opt. Lett.* **31**, 3297–3299 (2006).

Conferences

- L. McDonagh, C. Theobald, M. Serr, R. Wallenstein, R. Knappe, and A. Nebel, “54 W, 150 MHz, Passively Mode-Locked TEM₀₀ Nd:YVO₄ Oscillator Pumped at 888 nm,” ASSP 2007, Vancouver, WA5.
- L. McDonagh and R. Wallenstein, “34 W CW Intracavity-Doubled TEM₀₀ Nd:YVO₄ Green Laser Pumped at 888 nm,” ASSP 2007, Vancouver, MD4.
- L. McDonagh, R. Knappe, A. Nebel, and R. Wallenstein, “888-nm pumping of Nd:YVO₄ for high-power high-efficiency TEM₀₀ lasers,” Photonics West 2007 (Invited), San Jose, 6451–13.
- L. McDonagh, R. Wallenstein, and A. Nebel, “35 W at 355 nm from a mode-locked Nd:YVO₄ MOPA,” Photonics West 2007, San Jose, 6451–77.
- L. Mc Donagh, R. Knappe and R. Wallenstein, “50 W, 5 ns, high repetition rate Cavity-Dumped Q-switched TEM₀₀ Nd:YVO₄ Oscillator,” Post-deadline paper PDP 4, ASSP 2006, Lake Tahoe.
- L. Mc Donagh, R. Knappe, A. Nebel, and R. Wallenstein, “High power and high efficiency TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator pumped at 890 nm,” in CLEO/Europe 2005, CA6–5–THU.
- L. Mc Donagh, R. Knappe, A. Nebel, and R. Wallenstein, “Optimized pumping of Nd:YVO₄ with polarization-insensitive absorption for high power applications,” in Conference on Lasers and Electro-Optics (Optical Society of America, Washington, D.C., 2005), Baltimore, CMS5.

Patents

- L. McDonagh (principal inventor), R. Knappe, and A. Nebel, “Enhanced optical pumping of materials exhibiting polarization-dependent absorption,” EP 1482608, EP 1482607, US 2004/258117.
- L. McDonagh, “High-gain tapered laser gain module,” EP 1507321, US 2005/036532.
- L. McDonagh (principal inventor) and R. Wallenstein, “Apparatus and method for correcting a non-linear characteristic of a scanned light beam,” EP 1653266.

Magazines

- B. Hitz, “Generating High Green Power Without the Green Problem,” Photonics Spectra, May 2007, 92–93.
- B. Hitz, “Neodymium Vanadate Lasers Get Even Better,” Photonics Spectra, January 2007, 100–103.
- L. McDonagh and R. Wallenstein, “Optimized pumping of neodymium-doped vanadate for high-power lasers,” SPIE Newsroom, DOI: 10.1117/2.1200707.0708.

Contents

1	State of the art	1
1.1	Rods	2
1.1.1	End-pumped rods	2
1.1.2	Side-pumped rods	2
1.2	Slabs	3
1.2.1	End-pumped slabs	3
1.2.2	Side-pumped slabs	4
1.3	Disks	4
1.4	Fibers	5
1.5	Concept comparison	5
2	Optimized pumping of Nd:YVO₄	7
2.1	Nd:YVO ₄ . <i>A gifted laser material</i>	7
2.1.1	Physical structure	8
2.1.2	Spectroscopic properties	10
2.1.3	Heat generation	15
2.1.4	Thermo-optical and mechanical properties	22
2.2	End pumping. <i>High optical efficiency and high beam quality</i>	24
2.2.1	Pump-mode matching	24
2.2.2	Thermal lensing	26
2.2.3	Crystal stress and fracture	29
2.3	888 nm pumping of Nd:YVO ₄ . <i>The road to high power</i>	30
2.3.1	Limitations of 808 nm pumping	30
2.3.2	Absorption at 888 nm	31
2.3.3	Pump absorption, inversion, and gain	32
2.3.4	Energy-transfer upconversion	38
2.3.5	Finite element analysis	42
3	Continuous wave oscillation	49
3.1	Multimode resonator	49
3.1.1	Crystals	49
3.1.2	Diodes	52
3.1.3	Multi-transversal-mode oscillator	56

3.2	TEM ₀₀ resonators	62
3.2.1	Resonator design	62
3.2.2	TEM ₀₀ dynamically-stable resonator	66
3.2.3	Periodic resonator	69
3.3	Single-pass amplifier	71
3.3.1	Principle	72
3.3.2	Single-pass CW amplifier	74
3.4	Intracavity-doubled resonator	76
3.4.1	Second harmonic generation	77
3.4.2	Intracavity doubling	87
3.4.3	Intracavity-doubled TEM ₀₀ resonators	88
3.5	CW performance summary	91
4	Nanosecond pulse operation	95
4.1	Q-switching	96
4.1.1	Principle	96
4.1.2	Simulations	99
4.1.3	Q-switch technologies	102
4.1.4	Q-switched oscillator	106
4.2	Cavity-dumped Q-switching	109
4.2.1	Principle	109
4.2.2	CDQS oscillator	111
4.2.3	Stability	114
4.2.4	Second harmonic generation	117
4.3	Comparison	118
5	Picosecond pulse operation	121
5.1	Theory of passive mode locking	121
5.1.1	Principle of mode locking	121
5.1.2	Active mode locking	123
5.1.3	Passive mode locking	124
5.1.4	The semiconductor saturable-absorber mirror	126
5.2	Mode-locked oscillator with a saturable absorber mirror	129
5.2.1	Mode-locked oscillator design	129
5.2.2	Mode-locked oscillator performance	131
5.2.3	Mode-locked MOPA	134
5.3	Harmonic generation	134
5.3.1	Frequency doubling	135
5.3.2	Frequency tripling	136
5.4	Picosecond performance summary	139

6 Summary	141
------------------	------------

Bibliography	145
---------------------	------------

