

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Ferdinand-Braun-Institut gGmbH Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) Gustav-Kirchhoff-Str. 4 12489 Berlin
Förderkennzeichen:	03VP09212
Vorhabensbezeichnung:	Miniaturisiertes diodenlaserbasiertes Zwei-Photonen-Polymerisationssystem zur Herstellung nutzerdefinierter Mikrooptiken (MINI2PP) – Laserdiodenentwicklung
Fördernde Institution:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Projekträger:	VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
Laufzeit des Vorhabens:	01.11.2021 – 31.10.2024
Wiss. Geschäftsführer:	Prof. Dr. P. Scheele
Admin. Geschäftsführerin:	Dr. K.-I. Eiermann
Projektleiter:	Dr. A. Knigge

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Schlussbericht zum Teilvorhaben: Eingehende Darstellung

Verbundprojekt: Miniaturisiertes diodenlaserbasiertes Zwei-Photonen-Polymerisationssystem zur Herstellung nutzerdefinierter Mikrooptiken – MINI2PP

Teilvorhaben: Laserdiodenentwicklung

Förderkennzeichen: 03VP09212

Laufzeit: 01.11.2021-31.10.2024

1 Ergebnisse

1.1 Epitaxiedesign

Für die angestrebte Emissionswellenlänge von 780 nm kann über ein Strain-Engineering der aktiven Schicht bestimmt durch deren Zusammensetzung entweder eine Druck- oder Zugspannung eingestellt werden. Dies bestimmt, ob das emittierte Laserlicht transversal-elektrisch (TE) oder transversal-magnetisch polarisiert ist. Im Rahmen dieses Projekts wurden vier verschiedene Epitaxiestrukturen speziell für die Anwendung in der Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP) entwickelt. Sie unterscheiden sich im Verspannungstyp (Druck- oder Zugspannung) sowie in der Anzahl der Quantenfilme (Quantum Wells, QWs) – entweder Einzel- (SQW) oder Doppel- (DQW) Quantenfilme. Zur besseren Unterscheidung werden diese Konfigurationen in diesem Bericht als TM-SQW, TM-DQW, TE-SQW und TE-DQW in diesem Bericht. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die vier Designs; detaillierte technische Spezifikationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Epitaxiedesign

Epi.	Dicke WG	Material (WG, CL)	QW-Typ	QW (je)	Spacer / Barrier	Spannung	Pol.	Prozess
TM-SQW	2.5 μm	AlGaAs	GaAsP / SQW	11 nm	--	Zug	TM	1. & 2.
TM-DQW	4.8 μm	AlGaAs	GaAsP / DQW	11 nm	AlGaInAs	Zug	TM	1. & 2.
TE-DQW	4.8 μm	AlGaAs	InGaAsP / DQW	5 nm	GaAsP / AlGaAs	Druck	TE	1.
TE-SQW	1 μm	AlGaInP, Al-GaAs/AlInP	InGaP / SQW	7 nm	--	Druck	TE	2.

Die Eignung GaAs-basierter epitaktischer Strukturen mit asymmetrischem, breitem AlGaAs-Wellenleiterkern für Infrarot-Anwendungen ist gut belegt. Im ersten Fertigungsprozess wurden drei Varianten dieses Designs für die Chipfertigung ausgewählt. Die TE-DQW-Laser erwiesen sich jedoch aufgrund zu hoher Laserschwellen und geringer Effizienz als praktisch unbrauchbar.

Im zweiten Fertigungsprozess wurde daher die TE-DQW-Struktur durch eine symmetrische TE-SQW-Variante mit AlGaInP-Wellenleiterkern ersetzt, während die TM-SQW- und TM-DQW-Designs in beiden Prozessen getestet wurden, um deren Reproduzierbarkeit zu bestätigen.

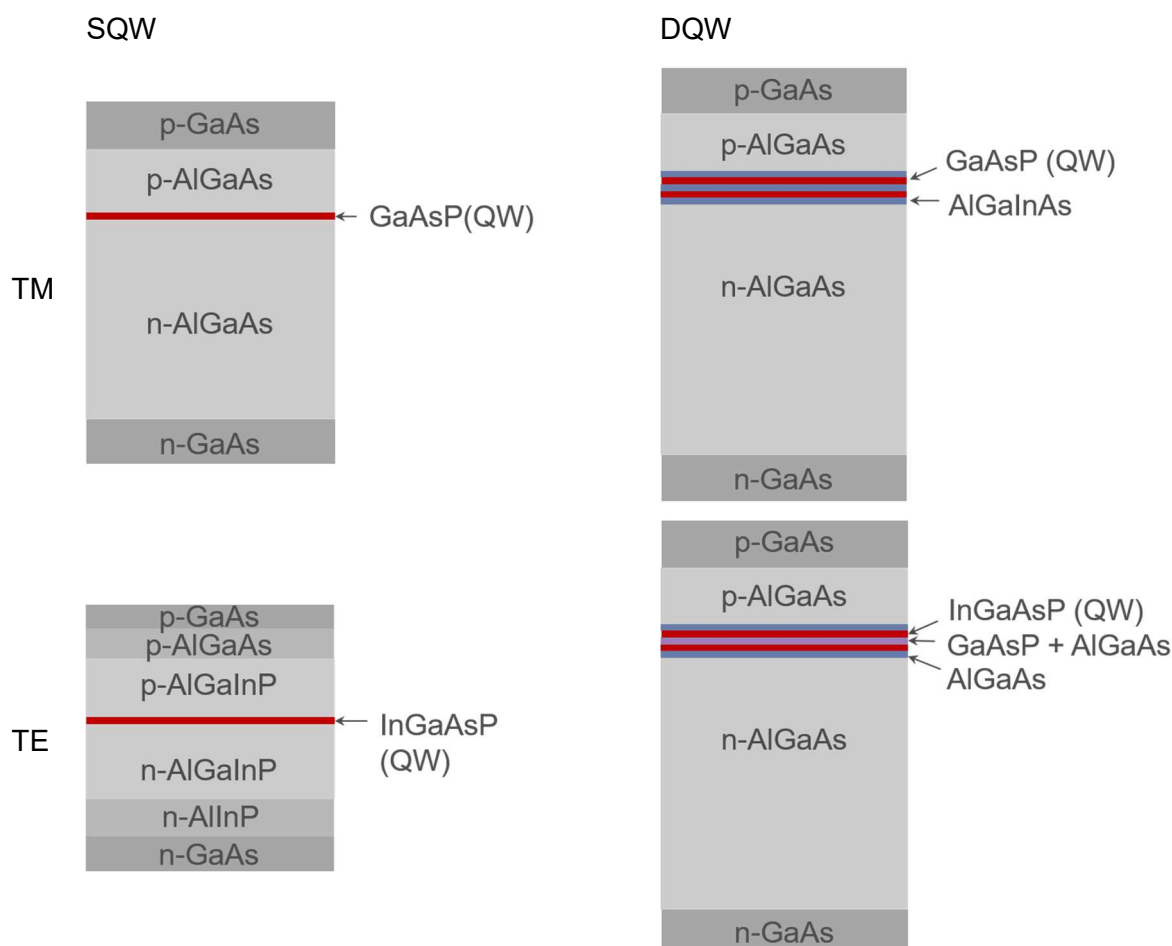


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Epitaxie-Schichtstrukturen

Die entworfenen epitaktischen Strukturen wurden mittels Metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) hergestellt. Vor der eigentlichen Bauelementfertigung erfolgte ein Schnell-Prozess zur Wafercharakterisierung. In dieser Phase wurden Breitstreifenlaser mit variierenden Resonatorlängen und Streifenbreiten prozessiert, um die Qualität der epitaktischen Schichten zu bewerten. Diese Fabry-Pérot-Breitstreifenlaser wurden im gepulsten Betrieb mit einer Pulsdauer von 1 μ s und einer Wiederholrate von 1 kHz charakterisiert. Diese Charakterisierung lieferte entscheidende Informationen über die optischen und elektrischen Eigenschaften der hergestellten epitaktischen Strukturen vor der vollständigen Bauelementverarbeitung.

Abbildung 2 zeigt die gemessenen optischen Spektren von zwei Testlasern jedes Wafers mit Resonatorlängen von 1 mm und 2 mm sowie einer Streifenbreite von 100 μ m. Die Ergebnisse bestätigen, dass die angestrebte Emissionswellenlänge von 780 nm (oder leicht darunter) im gepulsten Antestbetrieb für alle vier epitaktischen Designs erfolgreich erreicht wird.

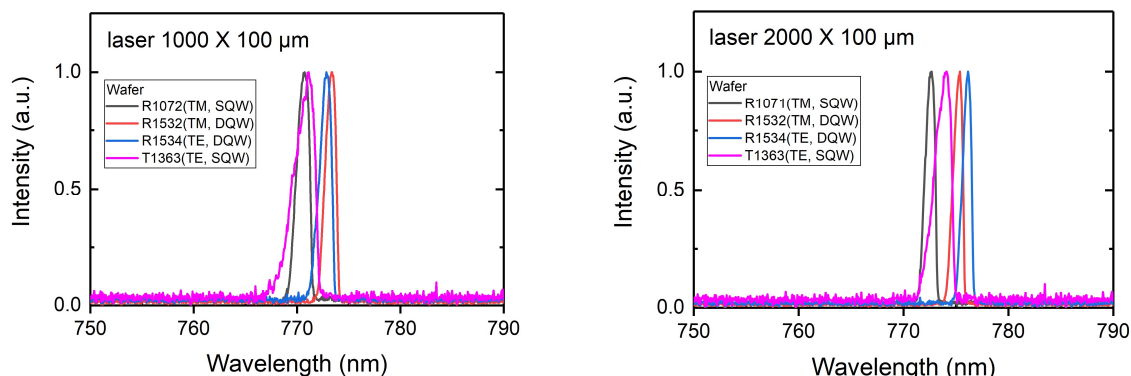


Abbildung 2: Optische Spektren von 1-mm- und 2-mm-Breitstreifenlasern mit 100 µm Streifenbreite

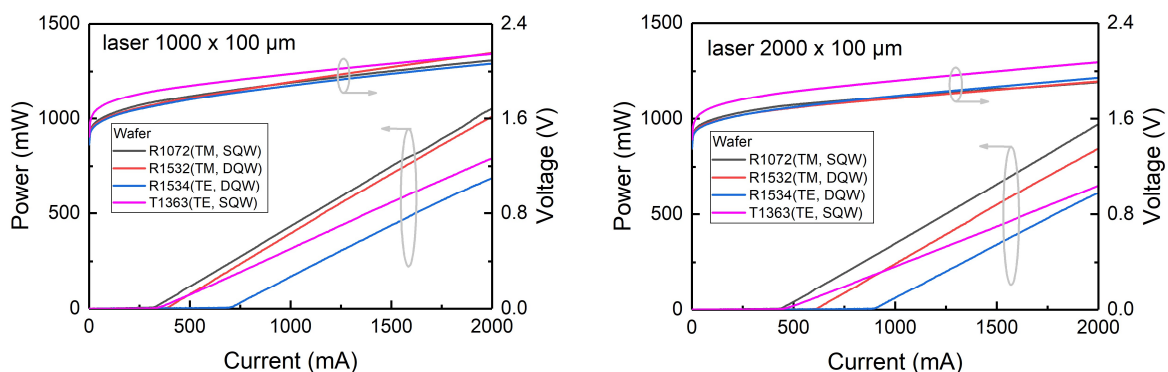


Abbildung 3: Charakteristische Leistungs-Strom-Spannungs-Kennlinien von 1-mm- und 2-mm-Breitstreifenlasern mit 100 µm Streifenbreite

Abbildung 3 zeigen die Leistungs-Strom-Spannungs-Kennlinien der getesteten Laser. Dabei wird deutlich, dass die beiden Laser mit TM-Polarisation niedrigere Schwellströme aufweisen. Die TE-SQW-Struktur erreicht einen Schwellstrom, der mit dem der TM-Laser vergleichbar ist. Im Gegensatz dazu weisen die TE-DQW-Laser nahezu die doppelte Schwellstromdichte im Vergleich zu den TM-Lasern auf, was auf eine deutlich geringere Effizienz schließen lässt. In Bezug auf die Ausgangsleistung erreichen die TM-Laser bei identischen Anregungsbedingungen höhere Ausgangsleistungen als die TE-Laser, was auf eine höhere Effizienz schließen lässt. Eine bemerkenswerte Beobachtung in den Leistungs-Strom-Kennlinien ist, dass die TE-SQW-Laser eine signifikant geringere Steilheit der Effizienzkurve zeigen, was auf höhere interne optische Verluste hindeutet.

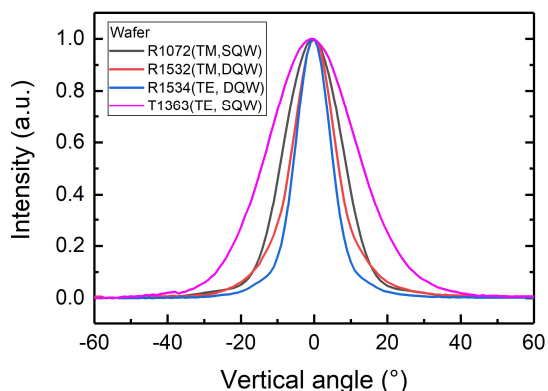


Abbildung 4: Vertikales Fernfeldprofil von 1-mm-Breitstreifenlasern mit 100 µm Streifenbreite.

Abbildung 4 zeigt die vertikalen Fernfeldverteilungen aller vier Epitaxiedesigns - ein entscheidender Parameter für die spätere Strahlfokussierung in der Anwendung. Die Ergebnisse demonstrieren eine klare umgekehrte Proportionalität zwischen der vertikalen Wellenleiterhöhe und der Fernfelddivergenz. Konkret zeigen die Laser mit 4,8 µm dicken Wellenleitern die geringste vertikale Divergenz, während die TE-SQW-Struktur mit ihrem nur 1 µm dünnen Wellenleiter die größte Divergenz aufweist. Die wesentlichen Parameter aus der Charakterisierung auf Waferenebene sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2 Erstcharakterisierung aller vier Wafer

Epitaxiedesign	Vert. Fernfeld $\theta_{VFF} / ^\circ$	Charakteristische Temperatur des Schwellenstroms T_0 / K	Interne Effizienz $\eta_i / \%$	Interne Verluste $\alpha_i / \text{cm}^{-1}$	Modale Verstärkung $\Gamma g_0 / \text{cm}^{-1}$	Transparenzstromdichte $J_T / \text{A/cm}^2$
	(1000 x 100 µm Laser)					
TM-SQW	18	114	84	0.63	13.2	133.4
TM-DQW	13.7	124	86	0.76	21.6	221
TE-DQW	11.2	74	74	0.49	12.2	265.6
TE-SQW	28	139	75	2.43	14.1	129.7

1.2 Laserdesign und Herstellungsprozess

Zur Realisierung eines kompakten, monolithisch modengekoppelten Lasers mit guter Strahlqualität bei gleichzeitig hoher Ausgangsleistung wurde der in Abbildung 5 dargestellte Laserentwurf gewählt. Der 6 mm lange Laser besteht aus drei funktionalen Sektionen: einem 200 µm langen sättigbaren RW-Absorber (Rippenwellenleiter) an der Rückfacette, einer 2 mm langen RW-Gewinnsektion im Inneren des Resonators zur Modenselektion für den Grundmodenbetrieb und einer 3,8 mm langen trapezförmigen (TP) Gewinnsektion an der Frontfacette zur Leistungsverstärkung. Die RW-Sektion weist eine Breite von 5 µm auf, während die TP-Sektion mit einem vollen Öffnungswinkel von 4° ausgelegt ist. Die Facettenbeschichtung beträgt 1 % (Frontfacette) bzw. 98 % (Rückfacette).

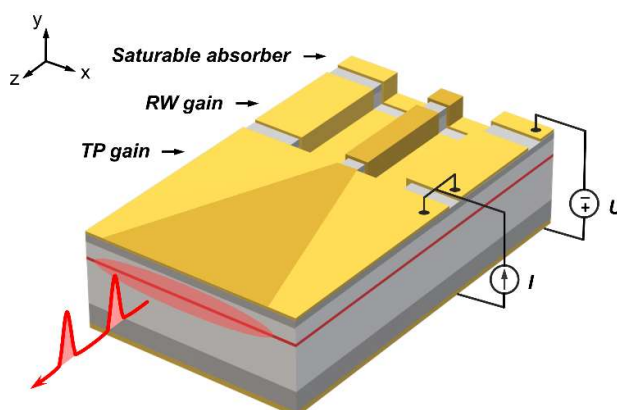


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines TP-Lasers

Wie in Abbildung 5 dargestellt, wurden die Gewinnsektionen in Durchlassrichtung mit einem Strom (I) gespeist, während der Absorberbereich an der Rückfacette mit einer Spannung (U) in Sperrrichtung betrieben wurde. Die Gewinnsektionen können entweder separat oder gemeinsam angesteuert werden. Obwohl die separate Ansteuerung der Gewinnsektion nur einen geringen Einfluss auf die Puls-Spitzenleistung hat, ermöglicht sie einen erweiterten stabilen Betriebsbereich. Zur Vereinfachung des Betriebs wird in diesem Bericht jedoch ausschließlich auf Ergebnisse mit gemeinsamer Ansteuerung Bezug genommen. Eine Ausnahme bilden die TE-SQW-Laser, bei denen sich unter gemeinsamer Ansteuerung eine instabile Modenkopplung zeigte, weshalb hier die Resultate bei getrennter Ansteuerung dargestellt werden.



Abbildung 6: Gehäuseoptionen – C-Mount mit zwei Kontakten (links), CCP-Mount (mit bis zu sechs Kontakten, mittel), Laserdioden-Chip mit Wärmespreizer-Sandwich-Montage (rechts).

Die in diesem Projekt verwendeten Montageoptionen für die Laserdioden sind in Abbildung 6 dargestellt. Der Aufbauprozess beginnt mit der Montage der einzelnen Laserdioden in p-side-up-Konfiguration auf CuW-Submounts. Für die schnelle Charakterisierung und Vorauswahl der Bauelemente erfolgte die Integration auf Standard-C-Mount-Gehäusen mit zwei separaten elektrischen Kontakten – jeweils einer für den Verstärkerstrom und einen für die Absorberspannung. Für die detailliertere Charakterisierung und finale Anwendung wird bevorzugt ein Conduction-Cooled-Package (CCP) verwendet. Dieses bietet gegenüber der C-Mount-Variante entscheidende Vorteile: eine deutlich verbesserte thermische Performance durch effizientere Wärmeableitung sowie eine flexiblere, separat ansteuerbare Kontaktierung der verschiedenen Laserbereiche. Zusätzlich wird bei allen Aufbauten ein weiterer Wärmespreizer auf die trapezförmige Gewinnsektion gelötet, was sowohl die thermische Stabilität durch optimierte Wärmeabfuhr als auch die elektrische Performance durch homogenere Stromverteilung deutlich verbessert.

1.3 Lasercharakterisierung

Die Charakterisierung der hergestellten Laser umfasst Leistungsmessungen, Pulsanalysen sowie optische und RF-Analysen, wie in Abbildung 7 dargestellt. Die Messungen erfolgten in drei aufeinanderfolgenden Schritten unter konstanter Temperaturbedingung (25 °C) auf einem thermostatierten Kühlkörper. Das emittierte Licht wurde dabei mittels einer asphärischen Linse fokussiert. Der charakteristische Messablauf gliedert sich wie folgt:

1. Leistungsmessung: Die zeitlich gemittelte Ausgangsleistung wird mit einem Leistungsmesser erfasst.
2. Pulscharakterisierung: Ein Autokorrelator ermittelt die zeitlich gemittelte Autokorrelationsfunktion des Pulszuges. Durch Anpassung einer Gauß-Funktion an die gemessene Autokorrelationskurve wird die Pulsdauer bestimmt, woraus sich die tatsächliche Pulsdauer rückberechnen lässt. Die Spitzenleistung ergibt sich anschließend aus der

gemittelten Ausgangsleistung (Schritt 1) und der fundamentalen RF-Wiederholfrequenz (Schritt 3).

3. Optische und RF-Analyse: Das Laserlicht wird in eine optische Faser eingekoppelt, wodurch gleichzeitige Messungen des optischen Spektrums und der RF-Frequenzkomponenten ermöglicht werden.

Die Messungen wurden systematisch unter verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt, indem sowohl der Verstärkerstrom als auch die Absorberspannung schrittweise angepasst wurden.

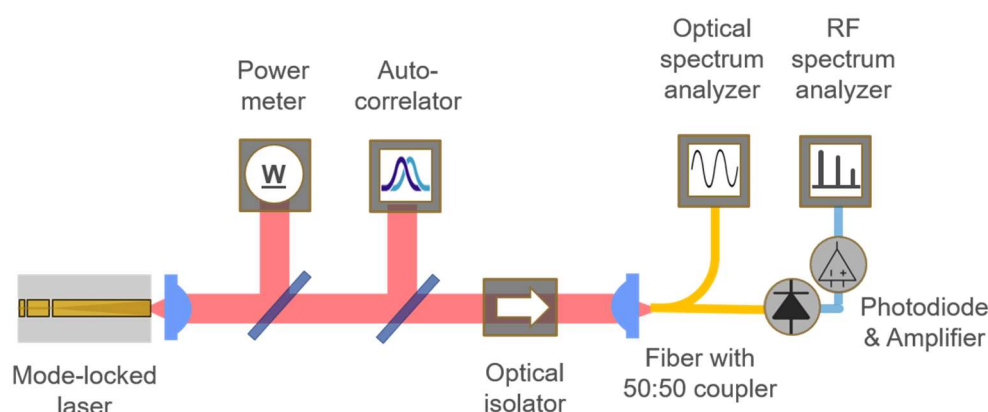


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Messaufbaus.

Abbildungen 8–11 zeigen die Charakterisierung der vier Lasertypen mit ihren Leistungs-Strom-Kennlinien unter variierenden Absorberspannungen sowie den berechneten Pulsbreiten und Spitzenleistungen für unterschiedliche Absorberspannungen. Zusätzlich sind für eine bestimmte Absorberspannung das optische Spektrum und das RF-Spektrum dargestellt. Exemplarische Messergebnisse umfassen die Autokorrelationskurve mit Gauß-Fit sowie die optischen und RF-Spektren für einen ausgewählten Arbeitspunkt.

Der TM-SQW-Laser in Abbildung 8 weist einen Schwellstrom von 1,5 A auf, der über verschiedene Absorberspannungen nahezu konstant bleibt. Oberhalb des Schwellstroms bleibt auch die mittlere Ausgangsleistung relativ stabil. Der Laser erreicht den stabilen Modenkopplungsbereich nicht unmittelbar oberhalb der Schwelle. Während dieser Übergang im Arbeitsbereich in der Leistungs-Strom-Kurve nicht deutlich erkennbar ist, wird er im Spektralverlauf sichtbar. Mit steigendem Gewinnstrom tritt plötzlich ein schmaler RF-Peak (mit einer 3-dB-Bandbreite von wenigen kHz) auf, begleitet von einem entsprechenden Einzelpeak im optischen Spektrum. Die gaußförmige Autokorrelationskurve bestätigt zusammen mit den spektralen Eigenschaften eine stabile Modenkopplung. Die fundamentale Repetitionsfrequenz beträgt 6,6 GHz, wobei die Pulsbreite ihr Minimum und die Spitzenleistung ihr Maximum erreicht. Die kürzeste erzielte Pulsdauer liegt bei etwa 7 ps bei einer Spitzenleistung über 40 W.

Der TM-DQW-Laser hat im Vergleich zum TM-SQW-Laser einen leicht erhöhten Schwellstrom (vgl. Abbildung 9). Oberhalb der Schwelle nimmt die Ausgangsleistung mit zunehmender Absorberspannung leicht ab. Ähnlich wie beim TM-SQW-Laser tritt die Modenkopplung nicht direkt oberhalb der Schwelle auf. Die Modenkopplung ist jedoch in Abhängigkeit vom Strom durch die Gewinnsektion instabil. Dies ist erkennbar durch die fluktuierenden Leistungs-Strom-Kennlinien, Spektren-Mappings und Pulsbreiten. Die fundamentale Repetitionsfrequenz beträgt 6,1 GHz mit einer minimalen Pulsbreite von etwa 5 ps und einer Spitzenleistung über 20 W.

In Abbildung 10 zeigen die Kennlinien der TE-DQW-Laser eine abruptes Ansprungsverhalten bei etwa 3,5 A, wobei der Ansprungsstrom stark von der angelegten Absorberspannung beeinflusst wird. Mit zunehmender Absorberspannung verschiebt sich der Ansprungsstrom zu höheren Gewinnströmen. Der Bereich der Modenkopplung setzt auch nicht direkt oberhalb dieser Schwelle ein. Der Übergang ist nicht nur in den Spektren und Autokorrelationsmessungen erkennbar, sondern manifestiert sich auch in der Leistungskurve durch einen charakteristischen Sprung in der Ausgangsleistung. Die gemessene Autokorrelationskurve weist einen dominanten kohärenten Peak auf, was auf eine instabile Pulsform oder auf die Emission mehrerer Pulse hindeutet. Die fundamentale Repetitionsfrequenz beträgt 6,2 GHz, bei einer minimalen Pulsbreite von etwa 4 ps und einer resultierenden Spitzenleistung von rund 12 W. Aufgrund der geringen Effizienz und der damit einhergehenden erhöhten Wärmeentwicklung wurde dieser Laser bei einer Kühlkörpertemperatur von 30 °C charakterisiert, da sich eine thermische Stabilisierung bei 25 °C als nicht zuverlässig realisierbar erwies. Die hohe Schwellenstromdichte sowie die geringe Effizienz wurden bereits in der Antestcharakterisierung festgestellt und bestätigen die zu erwartenden Eigenschaften dieser Laserstruktur.

Die Charakterisierung des in Abbildung 11 dargestellten TE-SQW-Lasers erfolgte unter getrennter Ansteuerung der RW- und TP-Sektionen, da sich bei gemeinsamer Ansteuerung ein extrem instabiler Modenkopplungsbetrieb zeigte. Die RW-Sektion wurde mit einem konstanten Strom von 150 mA betrieben. Der Übergang in den Modenkopplungsbereich war von einem abrupten Abfall der Ausgangsleistung begleitet. Die erzeugten Pulse wiesen eine Dauer von etwa 5 ps auf und zeigten eine hohe Stabilität über einen TP-Verstärkerstrombereich von nahezu 2 A hinweg, wobei die Spitzenleistung kontinuierlich zunahm und bis zu 40 W erreichte. Die gemessenen Autokorrelationskurven zeigten zudem einen kleinen kohärenten Peak. Die fundamentale Wiederholfrequenz lag bei etwa 6,9 GHz.

Ein Vergleich der Leistung aller vier Lasertypen zeigt, dass die beiden TM-Laser zusammen mit dem TE-SQW-Laser vergleichbare Schwellströme aufweisen, was mit den Ergebnissen aus dem Antest-Prozess übereinstimmt. Betrachtet man die mittlere Ausgangsleistung – beispielsweise bei einem Verstärkerstrom von 4 A –, so zeigen die TM-Laser eine höhere Konversionseffizienz als die TE-Laser, ein Trend, der ebenfalls im Antest vorhergesagt wurde. Dies führt dazu, dass TE-Laser größeren thermischen Verlusten unterliegen, was die Temperaturstabilisierung erschwert – wie es beim TE-DQW-Laser zu beobachten ist.

Insbesondere zeigt der TE-DQW-Laser einen abrupten Anstieg der Ausgangsleistung oberhalb der Laserschwelle, während die anderen Laser einen gleichmäßigeren Übergang in den Laserbetrieb aufweisen. Dieses Verhalten deutet auf eine zu starke Wirkung des sättigbaren Absorbers hin, so dass beim Hochfahren der Kennlinie die spontane Emission zunächst nicht ausreicht, den Absorber zu sättigen und daher kein Laserbetrieb ermöglicht wird.

Bei allen vier Lasertypen tritt stabiler Modenkopplungsbetrieb nicht unmittelbar an der Schwelle auf. Der Übergang in den stabilen Modenkopplungs-Zustand lässt sich durch Veränderungen im optischen Spektrum erkennen; bei TE-Lasern ist er zudem mit einem deutlichen Sprung in der mittleren Ausgangsleistung verbunden. Im Vergleich zur gemeinsamen Ansteuerung bietet die separate Ansteuerung der Gewinnsektionen einen deutlich größeren Bereich für einen stabilen Modenkopplungsbetrieb. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei getrennter Ansteuerung der Strom im RW-Bereich konstant bleibt, was eine stabile Filterwirkung für die Fundamentalmode ermöglicht. Bei gemeinsamer Ansteuerung hingegen variiert der RW-Strom gemeinsam mit dem TP-Bereich, was eine zusätzliche Störgröße in den Laserkavitätsbetrieb einführt und die Stabilität der Modenkopplung beeinträchtigen kann. Nichtsdestotrotz bietet die gemeinsame Ansteuerung den praktischen Vorteil, einen Stromtreiber weniger zu benötigen, was für kompakte Endsysteme ein entscheidender Faktor sein kann.

Beim Vergleich der Pulscharakteristik aller vier Laser zeigen TE-Laser optische Pulse mit geringfügig kürzerer Dauer als TM-Laser – etwa 5 ps für TE- und rund 7 ps für TM-Laser. Hinsichtlich der Spitzenleistung, die für viele Anwendungen ein entscheidender Parameter ist, übertreffen die SQW-Laser die DQW-Laser deutlich. Beide SQW-Laser erreichen im stabilen Modenkopplungsbereich Spitzenleistungen von bis zu 40 W. Dieser Unterschied lässt sich vermutlich durch eine effizientere Gewinnsättigung und einen stärkeren Modeneinschluss in den SQW-Strukturen erklären, welche die Pulskompression und Energieentnahme pro Puls begünstigen.

Ein weiterer entscheidender Faktor für 2PP-Anwendungen ist die Strahlqualität der emittierten Pulse. Aufgrund der monolithischen vertikalen Struktur bleibt das vertikale Fernfeldprofil weitgehend unverändert, wie bereits in Abbildung 4 gezeigt. Die laterale Feldverteilung hingegen wird durch die Verwendung einer TP-Gewinnsektion deutlich komplexer. Diese Komplexität resultiert aus der Wechselwirkung des sich ausbreitenden Lichts sowohl mit der Übergangsregion zwischen dem geraden und dem trapezförmigen Abschnitt als auch mit den lateralen Begrenzungen des Trapezes. Anders als beim vertikalen Feld, dessen Strahltaile typischerweise nahe der Austrittsfläche liegt, befindet sich die laterale Strahltaile weit innerhalb des Resonators – vermutlich im Bereich des Übergangs vom RW- zum TP-Abschnitt. Daher konzentriert sich die Strahlqualitätsanalyse vorrangig auf die laterale Richtung. Zudem zeigen experimentelle Beobachtungen, dass sich Nah- und Fernfeldprofile bei unterschiedlichen Vorspannungsbedingungen nur geringfügig verändern. Aus diesem Grund wird in Abbildung 12 ausschließlich die laterale Nahfeldverteilung für ausgewählte Betriebspunkte dargestellt.

Alle untersuchten Laser zeigen ein inhomogenes Nah- und Fernfeldprofil, was hauptsächlich auf Filamentierung zurückzuführen ist. Dieses Phänomen entsteht durch nichtlineare Wechselwirkungen zwischen dem optischen Feld und dem Verstärkermedium; relevante Beiträge liefern hierbei insbesondere der Kerr-Effekt sowie das räumliche Lochbrennen. Obwohl alle vier Laser über dasselbe Geometriedesign mit einer Frontaperturbreite von 270 μm verfügen, unterscheiden sich ihre Nahfeldverteilungen deutlich. Der TE-SQW-Laser zeigt die breiteste Nahfeldverteilung, die gut mit der geometrischen Breite des Trapezes übereinstimmt. Im Gegensatz dazu weist der TE-DQW-Laser das schmalste Nahfeldprofil auf. Die Unterschiede deuten darauf hin, dass im TM-SQW-Laser der gesamte trapezförmige Verstärkerbereich effizient genutzt wird, was sich in einer höheren optischen Effizienz widerspiegelt. Die verringerte Nahfeldbreite – insbesondere beim TE-DQW – lässt sich hauptsächlich auf eine thermisch induzierte Linse im Trapezteil zurückführen. Dieser Effekt führt zu einer stärkeren lateralen Modenkonzentration und somit zu einer reduzierten Effizienz. Infolge dieser thermischen Linse zeigt sich auch eine geringere Fernfelddivergenz. Da die Strahldivergenz umgekehrt proportional zur Strahltaile ist, resultiert daraus eine größere effektive Strahltaile sowie ein ausgeprägter Astigmatismus.

Trotz dieser Unterschiede weisen alle Laser – mit Ausnahme des TE-SQW – eine gute Strahlqualität auf, mit gemessenen M^2 -Werten um 1,1, was auf eine nahezu beugungsbegrenzte Emission hinweist. Insgesamt erzielt der TM-SQW-Laser die beste Strahlperformance, da seine gemessenen Parameter – in Bezug auf Nahfeldbreite, Strahltaile und Fernfeldwinkel – am besten mit dem geplanten Design übereinstimmen.

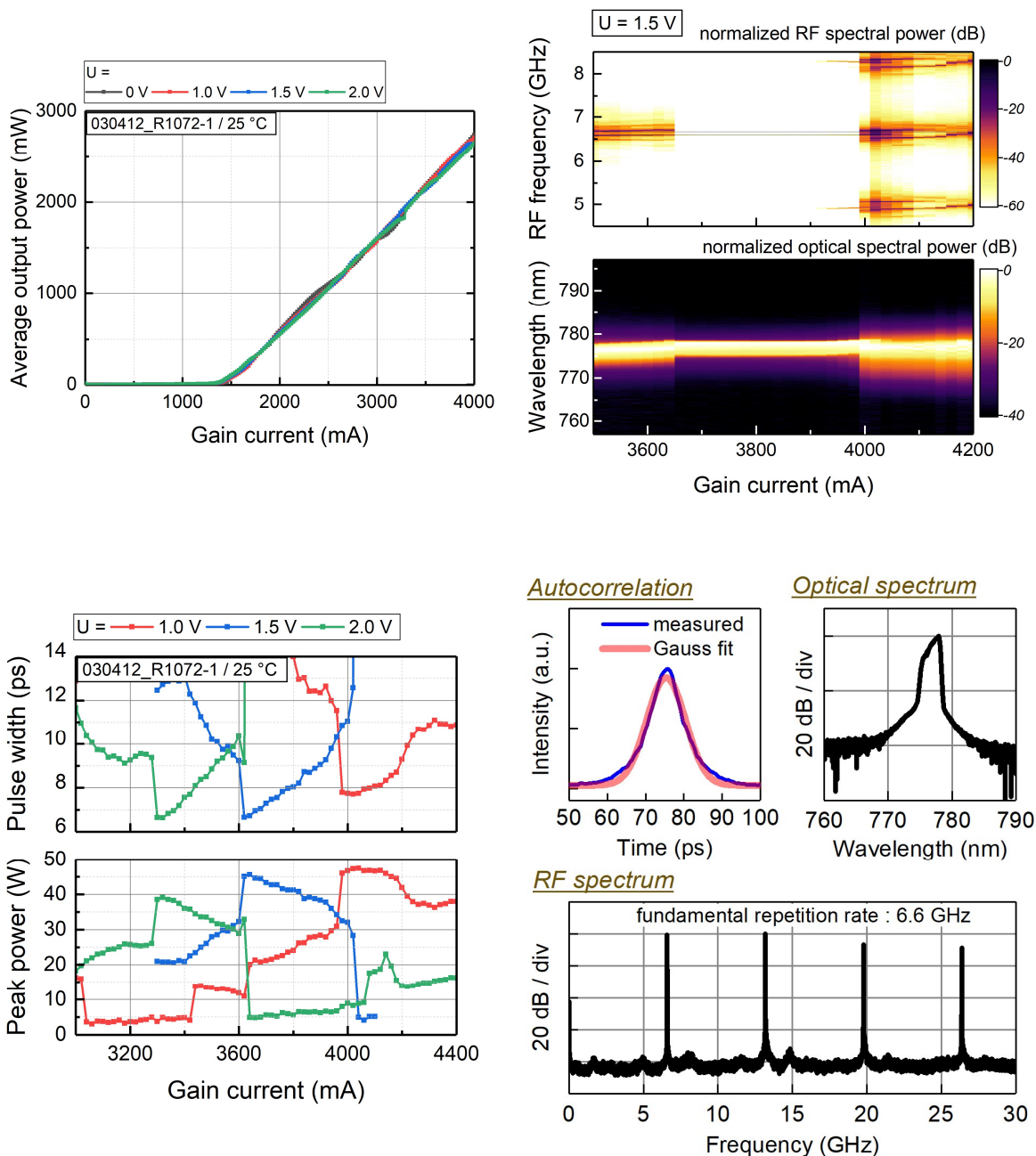


Abbildung 8: Charakterisierung des TM-SQW Lasers: Leistungs-Strom-Kurven bei unterschiedlichen Absorberspannungen (oben links); berechnete Pulsbreiten und Spitzenleistungen bei verschiedenen Absorberspannungen (unten links); Mappings der optischen und der RF-Spektren für einen bestimmten Absorberspannungswert (oben rechts); Beispiel der gemessenen Autokorrelationskurve und deren Gauß-Fit, optische und RF-Spektren für einen bestimmten Arbeitspunkt ($U = 1,5\text{ V}$ und $I = 3,7\text{ A}$) (unten rechts).

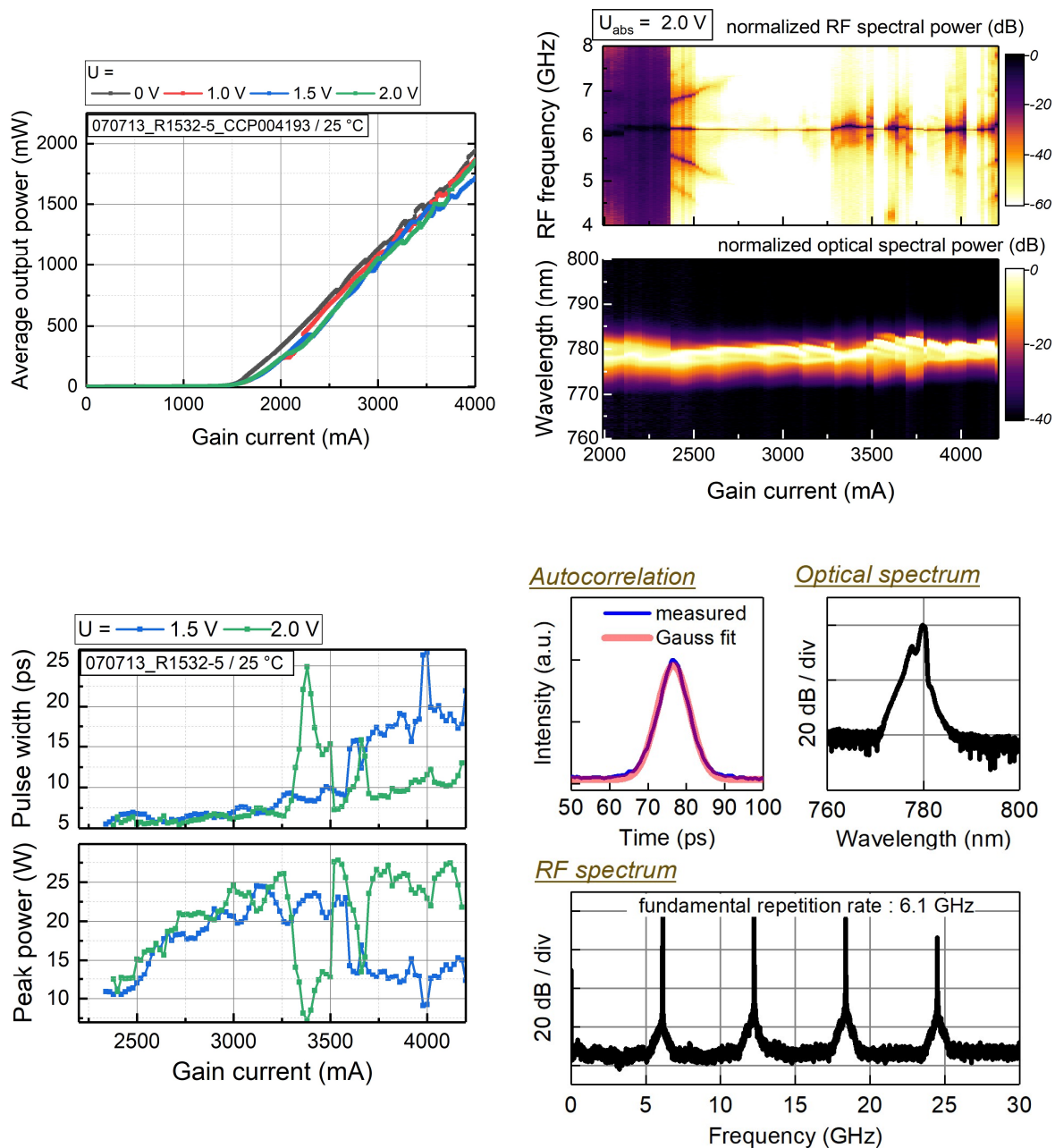


Abbildung 9: Charakterisierung des TM-DQW Lasers: Leistungs-Strom-Kurven bei unterschiedlichen Absorberspannungen (oben links); berechnete Pulsbreiten und Spitzenleistungen bei verschiedenen Absorberspannungen (unten links); Mappings der optischen und der RF-Spektren für einen bestimmten Absorberspannungswert (oben rechts); Beispiel der gemessenen Autokorrelationskurve und deren Gauß-Fit, optische und RF-Spektren für einen bestimmten Arbeitspunkt ($U = 2\text{ V}$ und $I = 3\text{ A}$) (unten rechts).

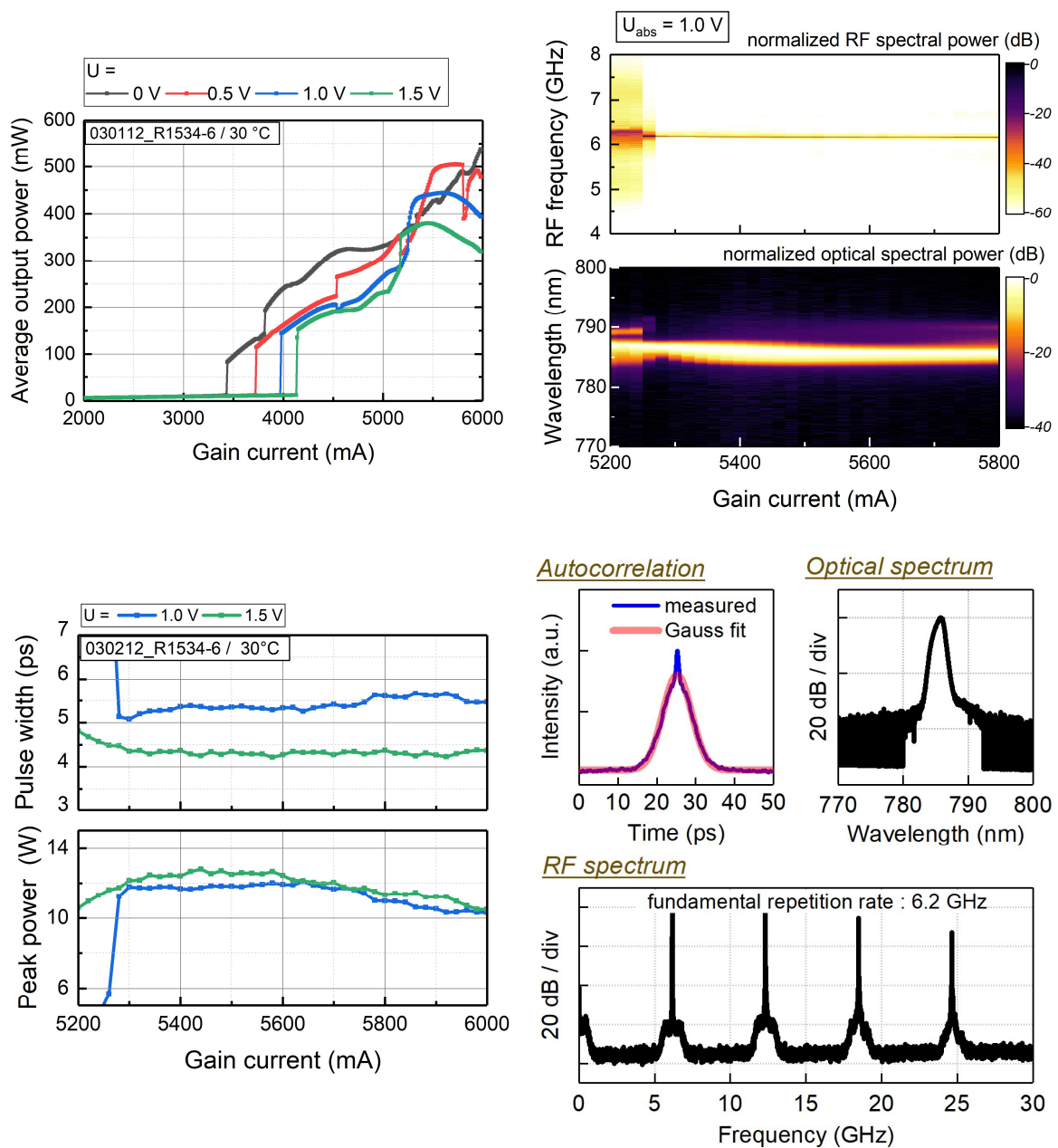


Abbildung 10: Charakterisierung des TE-DQW Lasers: Leistungs-Strom-Kurven bei unterschiedlichen Absorberspannungen (oben links); berechnete Pulsbreiten und Spitzenleistungen bei verschiedenen Absorberspannungen (unten links); Mappings der optischen und der RF-Spektren für einen bestimmten Absorberspannungswert (oben rechts); Beispiel der gemessenen Autokorrelationskurve und deren Gauß-Fit, optische und RF-Spektren für einen bestimmten Arbeitspunkt ($U = 1\text{ V}$ und $I = 5,5\text{ A}$) (unten rechts).

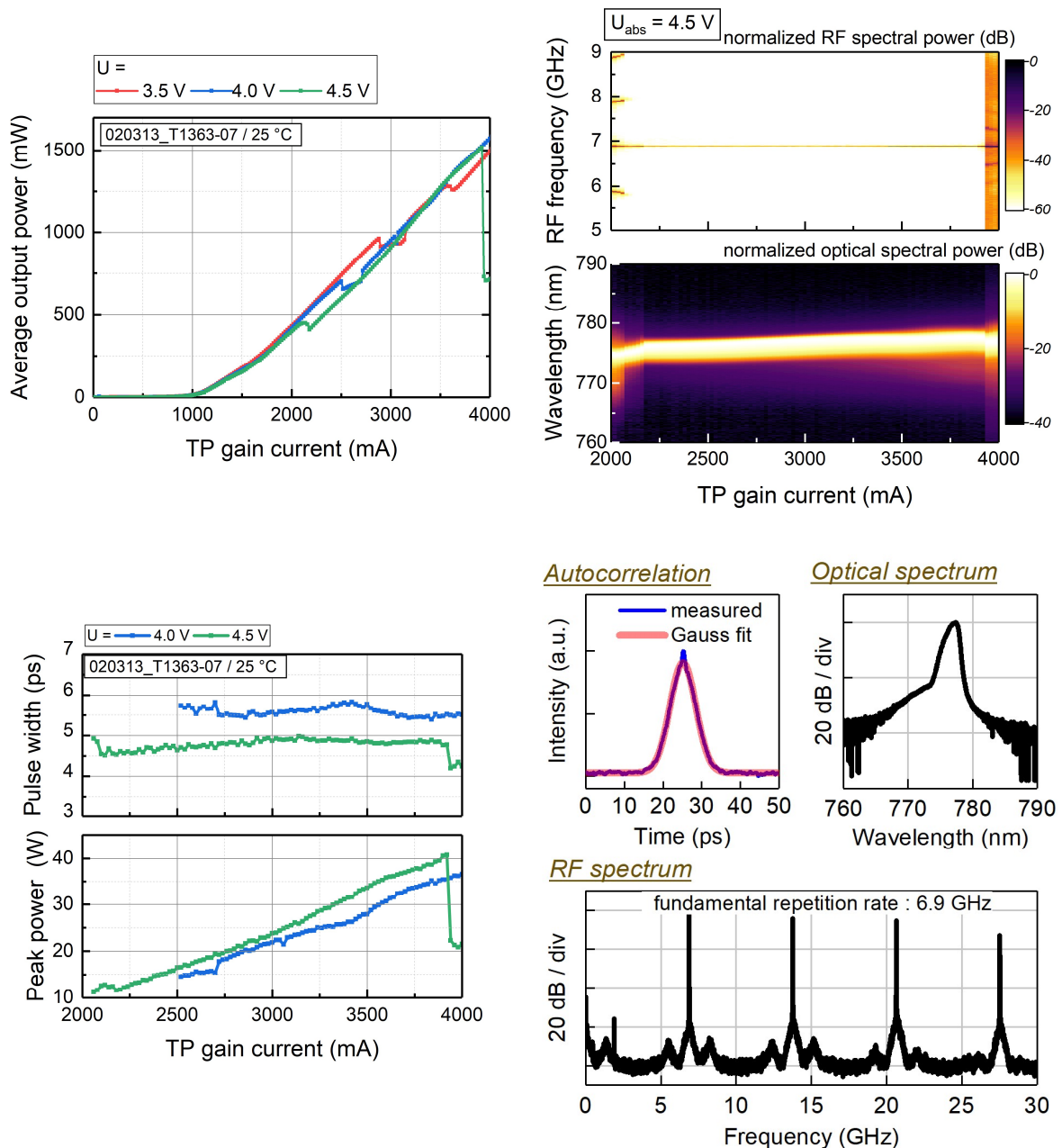


Abbildung 11: Charakterisierung des TE-SQW Lasers (mit $I_{\text{RW}} = 150 \text{ mA}$): Leistungs-Strom-Kurven bei unterschiedlichen Absorberspannungen (oben links); berechnete Pulsbreiten und Spitzenleistungen bei verschiedenen Absorberspannungen (unten links); Mappings der optischen und der RF-Spektren für einen bestimmten Absorberspannungswert (oben rechts); Beispiel der gemessenen Autokorrelationskurve und deren Gauß-Fit, optische und RF-Spektren für einen bestimmten Arbeitspunkt ($U = 4,5 \text{ V}$ und $I_{\text{TP}} = 3,5 \text{ A}$) (unten rechts).

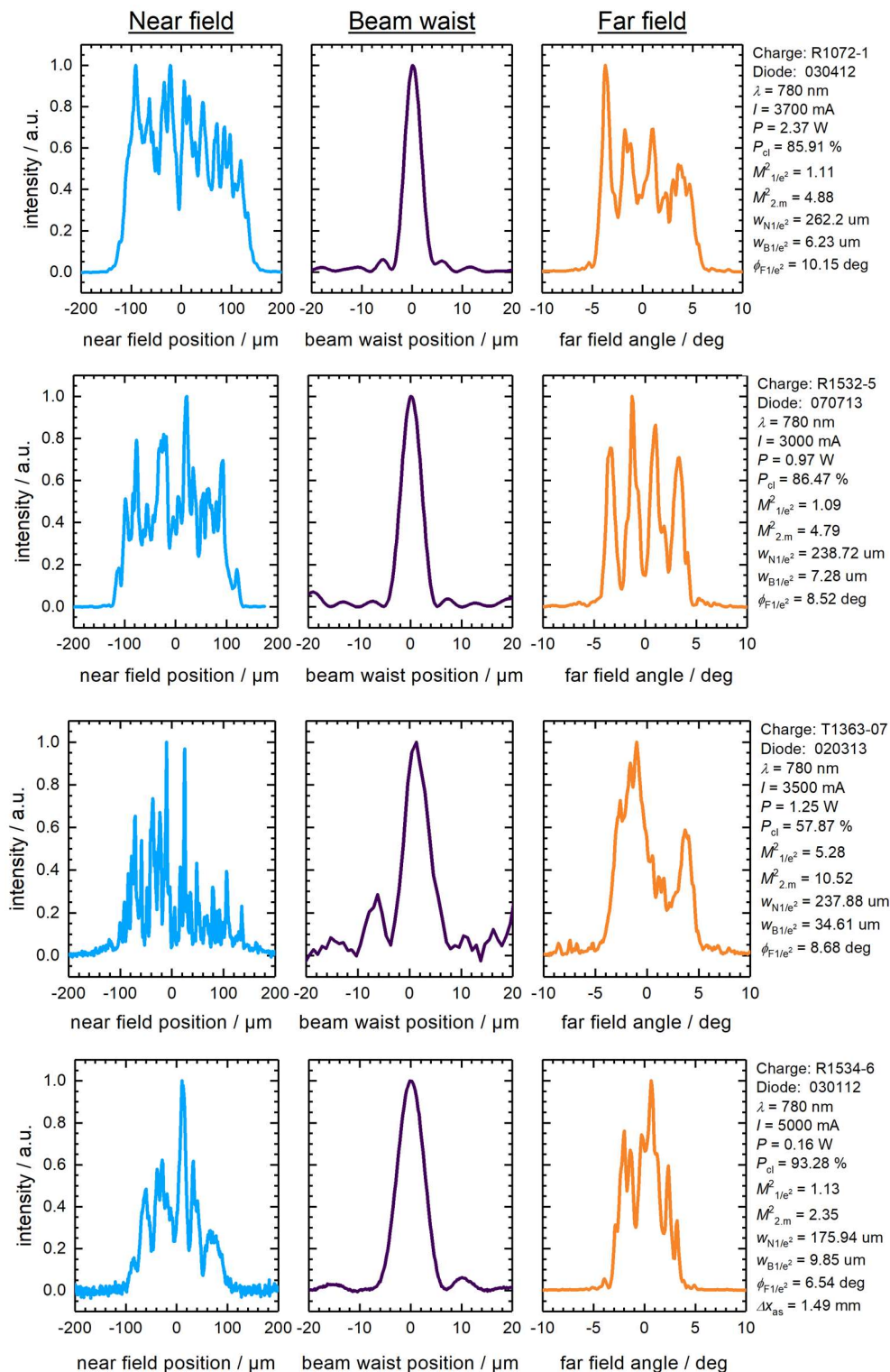


Abbildung 12: Laterales Nahfeld, Strahltaille und Fernfeld von vier verschiedenen Lasern (von oben nach unten: TM-SQW, TM-DQW, TE-SQW und TE-DQW).

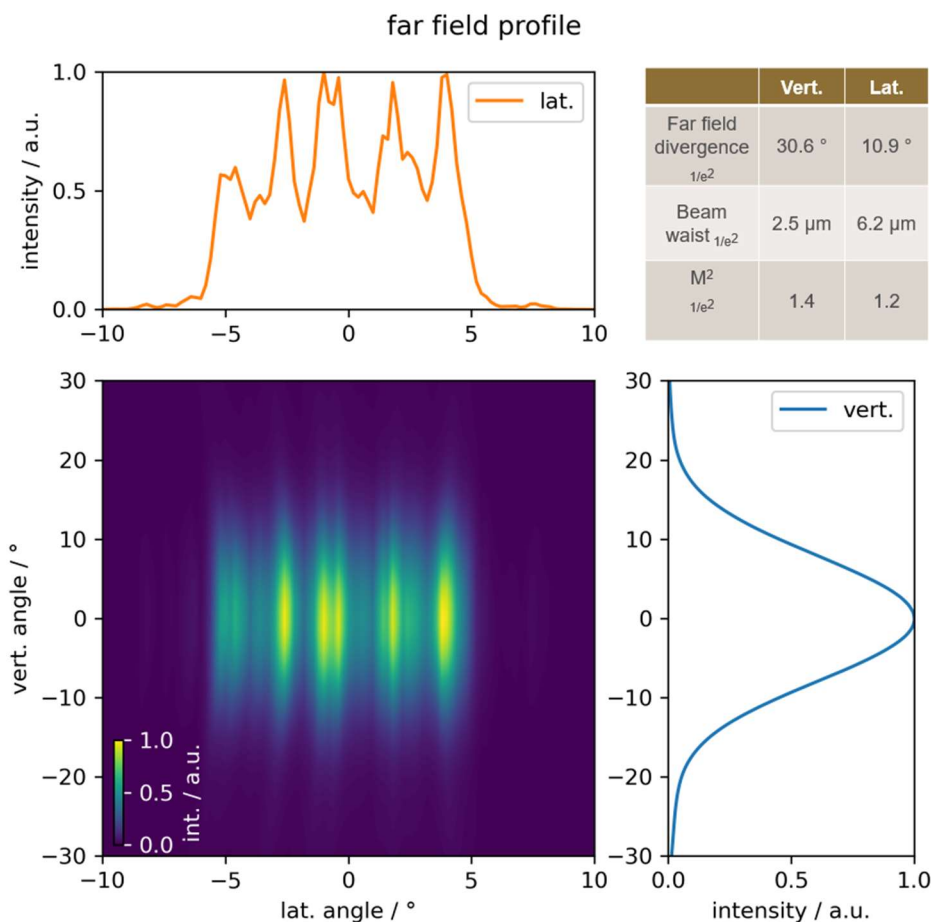


Abbildung 13: Beispiel eines 2D-Fernfeldprofils eines TM-SQW-Lasers.

Basierend auf den oben genannten Messungen, insbesondere in Bezug auf die optische und Pulsleistung sowie die Strahlqualität, erscheint der TM-SQW-Laser aufgrund seiner Kombination aus hoher Spitzenleistung und exzellenter Strahlqualität als der am besten geeignete Kandidat für die Zielanwendung. Um seine Eignung weiter zu bewerten, wurde ein vollständiges 2D-Fernfeldprofil für den TM-SQW-Laser gemessen, wie in Abbildung 13 dargestellt. In der lateralen Richtung zeigt das Fernfeld, wie bereits zuvor besprochen, Filamentierung, während es in der vertikalen Richtung ein gaußförmiges Single-Mode-Profil aufweist, das mit den Ergebnissen in Abbildung 4 übereinstimmt. Die gemessenen Fernfeld-Divergenzwinkel betragen 31° in der vertikalen Richtung und 11° in der lateralen Richtung. Die entsprechenden M^2 -Werte liegen bei 1,4 bzw. 1,2 und bestätigen weiter die hohe Strahlqualität des TM-SQW-Lasers.

1.4 Simulation

Die Simulation der trapezförmigen Laser wurde mit dem WIAS-BALaser-Tool durchgeführt, um tiefere Einblicke in deren Betriebsverhalten zu gewinnen. Dieses numerische Framework basiert auf der Lösung zeitabhängiger Travelling-Wave-Gleichungen, die vollständig die laterale und longitudinale Dimension sowie die Zeit berücksichtigen. Dadurch werden die strukturellen Variationen, die durch den Trapezbereich eingeführt werden, genau erfasst. Darüber hinaus umfasst die Simulation eine umfassende Beschreibung des Ladungsträgertransports im lateralen-vertikalen Bereich, wobei die laterale Stromverteilung im und jenseits des Kontaktstreifens, die Ladungsträgerdiffusion und das räumliche Lochbrennen modelliert werden.

Ein stationäres thermisches Modell für die laterale-longitudinale Temperaturverteilung ist ebenfalls integriert und interaktiv mit den optischen und Ladungsträgermodellen gekoppelt, sodass die thermisch abhängige Parameter angepasst werden können, was die Vorhersagegenauigkeit verbessert.

Da einige Schlüssel-Simulationsparameter auf Basis experimenteller Messungen angepasst werden mussten, wurden Simulationen nur für die Wafer des ersten Fertigungsprozesses durchgeführt, d. h. die TM-SQW-, TM-DQW- und TE-DQW-Strukturen. Die Abbildungen 14 bis 16 zeigen beispielhafte Simulationsergebnisse für jeden Lasertyp, die deren Ausgangspulsreihen, optische und RF-Spektren sowie zusätzliche intra-Cavity Eigenschaften veranschaulichen.

Aufgrund der inhärenten Einschränkungen des Simulationswerkzeugs bei der genauen Modellierung des Mode-Locking-Verhaltens sollten die Ergebnisse qualitativ anstatt quantitativ interpretiert werden. Die simulierten Emissionswellenlängen für alle drei Lasertypen liegen bei etwa 760 nm, was mit dem ursprünglichen epitaktischen Design übereinstimmt. Die prognostizierten Wiederholfrequenzen, die bei etwa 6 GHz liegen, stimmen ebenfalls gut mit den experimentellen Messungen überein. Die geringe Auflösung des simulierten RF-Spektrums geht auf die zu kurze für die Fourier-Transformation aufgewendete Simulationszeit zurück.

Alle drei Laser erzeugen eine periodische Pulsreihe, was den Modenkopplungsbetrieb bestätigt. Es wird eine Amplitudenmodulation beobachtet, die den gemessenen Mustern des RF-Spektrums entspricht. Zudem zeigt sich Amplitudenjitter als Seitenschwingungen um die Hauptwiederholfrequenz, was auf Schwankungen der Pulsintensität über die Zeit hinweist.

Über die Validierung der Modenkopplung hinaus liefern die Simulationen wertvolle Einblicke in die Intra-Cavity-Dynamik. Die Ergebnisse zeigen, dass die Feldintensitätsverteilung im trapezförmigen Bereich kleiner ist als die tatsächliche TP-Kontaktregion. Dies korreliert mit der Ladungsträgeransammlung an den inneren Kanten, wobei überschüssige Ladungsträger außerhalb der Kontaktregion zu starken Pulsgrenzinteraktionen führen, insbesondere an der Übergangsstelle zwischen dem Trapezbereich und dem RW-Bereich. Die Temperaturverteilung zeigt zudem eine deutliche Überhitzung an der vorderen Facette, die zu thermischen Linsen-Effekten und einer Verengung des Nahfeldprofils führt.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer weiteren Optimierung des Trapezdesigns. Die Ladungsträgeransammlung und die Muster der Feldverteilung deuten darauf hin, dass die aktuelle Geometrie verfeinert werden könnte, um Pulsverzerrungen zu minimieren. Zudem hebt die beobachtete Überhitzung an der vorderen Facette die entscheidende Bedeutung des thermischen Managements im Trapezbereich hervor. Zur Minderung der thermischen Effekte und zur Sicherstellung einer stabilen Laserleistung wird eine optimierte Wärmeleitungsstrategie empfohlen – insbesondere die Verwendung eines CCP-Montagesystems mit einer Submount-Sandwich-Konfiguration zur Verbesserung der Wärmeableitung.

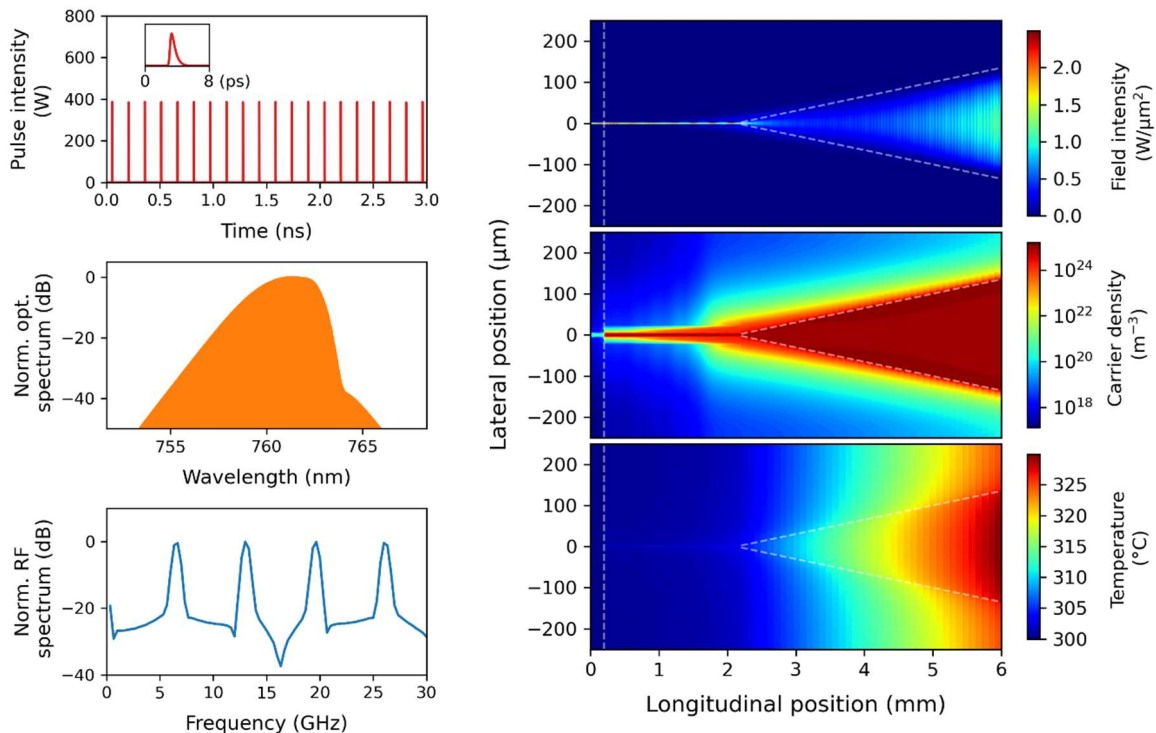


Abbildung 14: Simulation des TM-SQW Lasers bei einer mittleren Ausgangsleistung von 2,1 W: Ausgangspulsreihe und ein Beispiel eines einzelnen Pulses (oben links); optische Spektren (mittig links) und RF-Spektren (unten links); zeitlich gemittelte Intra-Cavity-Feldintensität (oben rechts), Ladungsträgerdichte (mittig rechts) und Temperaturverteilungen (unten rechts).

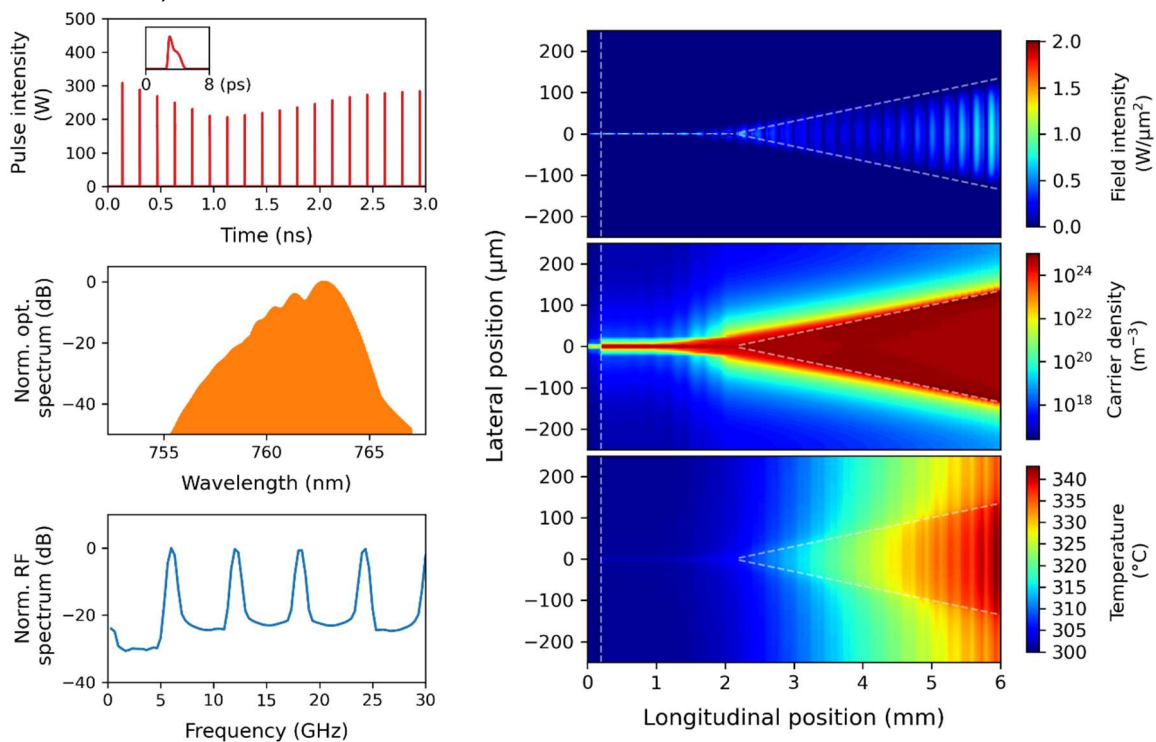


Abbildung 15: Simulation des TM-DQW Lasers bei einer mittleren Ausgangsleistung von 2,1 W: Ausgangspulsreihe und ein Beispiel eines einzelnen Pulses (oben links); optische Spektren (mittig links) und RF-Spektren (unten links); zeitlich gemittelte Intra-Cavity-

Feldintensität (oben rechts), Ladungsträgerdichte (mittig rechts) und Temperaturverteilungen (unten rechts).

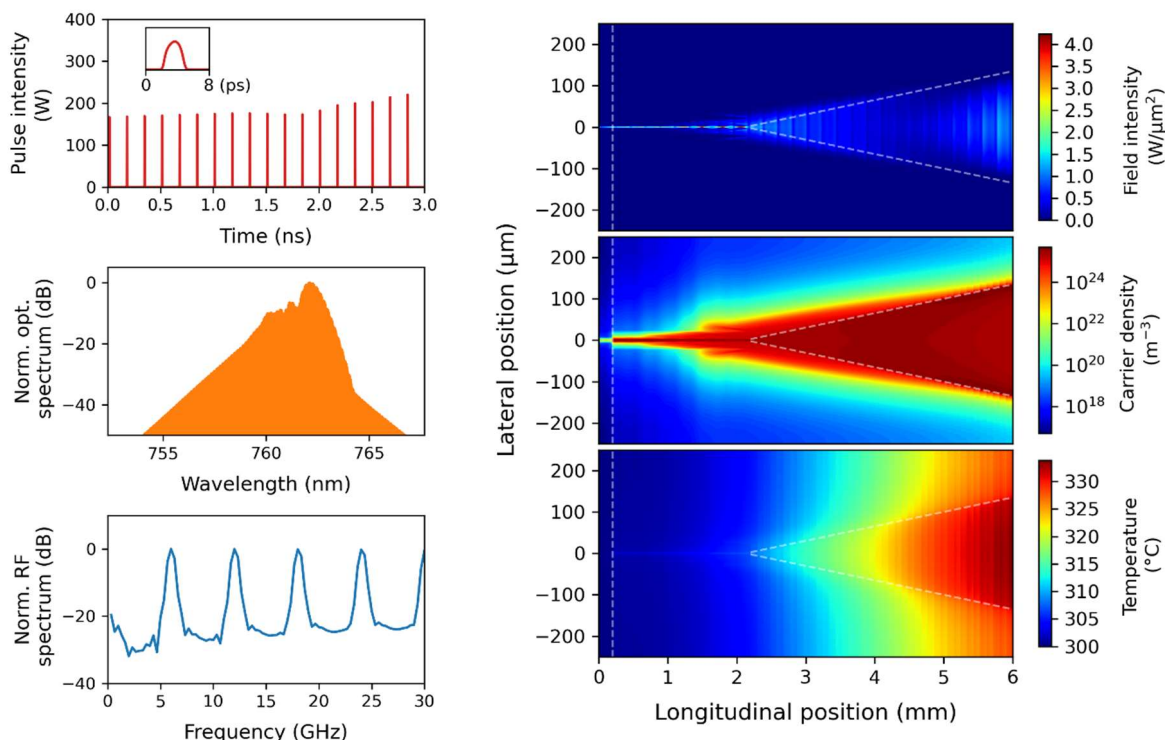


Abbildung 16: Simulation des TE-DQW Lasers bei einer mittleren Ausgangsleistung von 2,1 W: Ausgangspulsreihe und ein Beispiel eines einzelnen Pulses (oben links); optische Spektren (mittig links) und RF-Spektren (unten links); zeitlich gemittelte Intra-Cavity-Feldintensität (oben rechts), Ladungsträgerdichte (mittig rechts) und Temperaturverteilungen (unten rechts).

2 Anwendungen

Im Rahmen des MINI2PP-Projekts hat das FBH Laser mit C-Mount- und CCP-Montage an die Projektpartner für Lasertests und die Integration in das neu angepasste, miniaturisierte und programmierte 2PP-System geliefert. Angesichts der Anforderungen an die Ausgangsleistung und Strahlqualität stammten die gelieferten Laser hauptsächlich von den TM-Wafern.

Abbildung 17 zeigt ein SEM-Bild einer Mikrostruktur, eines miniaturisierten Bergbau-Turms, der mit dem modengekoppelten Diodenlaser des FBH für die Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP) hergestellt wurde. Das eingesetzte Bauelemente war ein TM-SQW-Laser, der im Modenkopplungsbetrieb arbeitete, mit einer Pulsbreite von 7 ps und einer Spitzenleistung von 34 W. Die hohe Spitzenleistung des Pulses ermöglichte eine einzeilige Fertigung in einem einzigen Scan und erleichterte die schnelle Erstellung komplexer dreidimensionaler Strukturen innerhalb einer angemessenen Bearbeitungszeit.

Die reduzierte strukturelle Detailtreue, die in der gefertigten Mikrostruktur beobachtet wurde, kann wahrscheinlich auf eine Überbelichtung zurückgeführt werden. Eine mögliche Ursache dafür könnte eine nicht optimale Fokussierung des Strahls am Druckpunkt sein. Trotz dieser Einschränkungen stellt diese Demonstration einen wichtigen und vielversprechenden Meilenstein dar. Die erfolgreiche Anwendung von modengekoppelten Diodenlasern in der 2PP-Technologie unterstreicht das Potenzial für kostengünstigere und kompaktere 2PP-Systeme in der

Zukunft und erweitert den Zugang zu dieser fortschrittlichen Fertigungstechnologie.

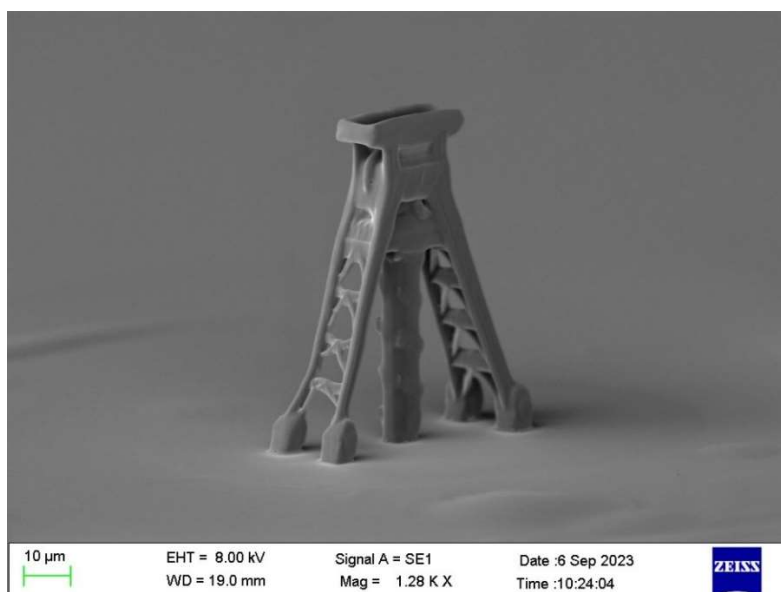


Abbildung 17: SEM-Bilder eines Bergbauturms, der durch 2PP unter Verwendung eines TM-SQW modengekoppelten Diodenlasers gefertigt wurde.

3 Veröffentlichungen

Wohlfeil, Shulin, et al. "Generation of picosecond pulses from tapered laser diodes with over 40 W peak power at wavelengths of 780 nm and 830 nm." *2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*. IEEE, 2023.

Wohlfeil, Shulin, et al. "Passively mode-locked monolithic diode lasers with a tapered gain section generating picosecond pulses with 45 W peak power at 780 nm." *SPIE Photonics West 2024*, vol. 12867, pp. 128670T. SPIE, 2024.