

## РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за присъждане на  
образователната и научна степен „Доктор”

**Автор на дисертационния труд: Веселин Станимиров Александров**  
докторант към катедра „Квантова електроника”, физически факултет,  
СУ "Кл. Охридски”

**Тема на дисертационния труд:** "Техники за синхронизация на модовете на лазери, излъчващи в спектралната област от 1 $\mu\text{m}$  до 2 $\mu\text{m}$ ".

**Професионално направление** 4.1-физически науки (физика на вълновите процеси)

Представеният дисертационен труд е посветен на развиване и изследване на техники за пасивна синхронизация на модовете на твърдотелни лазери генериращи в диапазона от 1 $\mu\text{m}$  до 2 $\mu\text{m}$  с използването на GaSb-базиран SESAM и въглеродни нанотръбички в качеството на насищаем абсорбер, както и метода на  $\chi^{(2)}$ -леща формирана в кристал за генерация на втора хармонична. Темата е много актуална за разширяване на спектралния диапазон за генерация на свръхкъси лазерни импулси с оглед многобройните им приложения в съвременните технологии и фундаменталните изследвания. При постигането на тази цел са получени важни, в това число – рекордни резултати, които са публикувани в реномирани научни списания с импакт фактор. Това прави представените изследвания значими в научно и приложно отношение и, поради това, дисертабилни.

### **I. Структура и общо описание на дисертационния труд.**

Дисертационният труд на Веселин Александров е в обем 85 печатни страници и е структуриран в следните основни части: Въведение, обща част, състояща се от Глава 1 и Глава 2, специална част, състояща се от Глава 3 и Глава 4, Заключение и Литература. Текстът е допълнен със списък на публикациите на автора, забелязани независими цитирания, приноси на автора и благодарности. Представеният материал е илюстриран с 43 фигури и графики и 5 таблици. Литературата съдържа общо 111 заглавия. Основната цел на дисертацията е ясно формулирана. Изложението е стегнато и издържано в прецизен научен стил. Авторът много добре владее научната терминология в областта и правилно я използва.

Във *Въведението* към дисертацията е направен кратък обзор на мястото и значението на лазерите генериращи свръхкъси (пико и фемтосекундни) импулси в съвременната наука и авангардните технологии. Специално внимание е отделено на предимствата на спектралния диапазон около 2 $\mu\text{m}$  за широкия кръг приложения в области като лазерна обработка на материали, прецизната лазерна хирургия, нелинейната оптика, оптичните комуникации в свободното пространство, мониторинг и контрол на околната среда и др. Отбелязани са проблемите и са посочени очертаващите се най-перспективни методи за синхронизация на модовете за лазерите генериращи в този диапазон. В контекста на очертаните проблеми ясно са формулирани целите и задачите пред дисертационния труд.

*Глава 1* представя общата теория на синхронизация на модовете. Описано е формирането на електрическото поле на лазерното лъчение в резонатора като суперпозиция на надлъжни модове в случай на случайни и синхронизирани фази. Представен е аналитичен вид на резултантното поле и интензитета за фазово синхронизирани модове.

Разгледани са активния и пасивен метод за синхронизация на лазерните модове. Представен е работният механизъм при активната синхронизация на модовете, изяснена е

ролята на модулатора и е определено условието за честотата на модулация за модово синхронизиране на генерирания спектър. Изложен е принципът на работа на лазера при пасивна синхронизация на модовете и е описан механизмът за възникване и формиране на къс импулс. Специално внимание е отделено на насищаемите поглътители, като са систематизирани и описани техните основни параметри.

Систематизирани са основните модели описващи пасивните методи за синхронизация на модовете базирани на бързината (времената на релаксация) на насищаемия поглъtitел и поведението на насищане на усилването на активната среда. Физическите процеси са описани в рамките на уравнението на Хаус, отчитащо по един физически ясен начин времевата динамика на импулса в модово-синхронизирания лазер. В рамките на този подход са включени процесите: усилване на активната среда, загуби от активен амплитуден модулатор или бърз насищаем поглъtitел, дисперсия на груповата скорост, фазова самомодулация. Влиянието на тези процеси е представено в термините на линейни диференциални оператори. Представени са аналитични решения на уравнението на Хаус за стационарната форма на обвивката и продължителността на импулса при лазери с активна и пасивна синхронизация на модовете за някои основни случаи свързани с параметрите на насищаемия поглъtitел и насищане на усилването. Представените компактни аналитични резултати са много полезни при анализ и конструиране на реални лазерни системи. Специално внимание е отделено на солитоновия режим на формиране на импулса при модово-синхронизираните лазери. Обсъдени са и проблемите свързани с нестабилността на генерираните импулси и, по-специално, критериите за избягване на режима на Q-модулация при тези лазери.

*Глава 2* е посветена на техниките за получаване на пасивна синхронизация на модовете в спектралния диапазон от 1 $\mu$ m до 2 $\mu$ m. Разгледани са три от най-често използваните за целта техники основаващи се на: насищаеми поглъtitели, формиране на нелинейна (Кер) леща в резонатора и нелинейна промяна на поляризацията.

В рамките на техниката базирана на насищаеми поглъtitели, специално внимание е отделено на полупроводниковите насищаеми поглъtitели комбинирани с огледало (Semiconductor Saturable Absorber Mirror - SESAM) и тези с въглеродни нанотръбички и графен, очертаващи се като най-перспективни за стабилен режим на синхронизация на модовете в диапазона около 2 $\mu$ m. Представена е структурата на насищаемия поглъtitел тип SESAM. Разгледани са процесите на възбуждане и релаксация на електроните в полупроводниковата структура и са представени характерните времекопстанти на процесите определящи релаксационната крива на SESAM. Представени са перспективни материали за SESAM в диапазона около 2 $\mu$ m и технологиите за подобряване на параметрите на тези насищаеми поглъtitели. Разгледани са основните свойства и параметри на насищаемите абсорбери базирани на въглеродни наноструктури (въглеродните нанотръбички и графен). Систематизирани са предимствата и недостатъците на тези два типа насищаеми поглъtitели.

Представен е механизма на формиране и работа на Кер-лещата за модулация на загубите и синхронизация на модовете на лазера. Обсъдени са случаите на "твърда" и "мека" апертура в рамките на тази техника. Представен е израз за оптичната сила на Кер-лещата от параметрите на нелинейната среда, лазерния мод и импулса. Систематизирани са предимствата и недостатъците на този метод за синхронизация на модовете.

Подробно е обсъдена техниката за синхронизация на модовете базирана на вътрешнорезонаторна генерация на втора хармонична с нейните три разновидности: формиране на нелинейна  $\chi^{(2)}$ -леща в кристал за генерация на втора хармонична, нелинейно огледало и нелинейна промяна на поляризацията. Формирането на нелинейна леща в кристал е изяснено на базата на уравненията на свързаните вълни за основната вълна и втората

хармонична. Представен е аналитичен израз за ефективния нелинеен показател на пречупване за основната вълна. Изяснен е механизмът на работа на нелинейното огледало и неговото приложение за синхронизация на модовете. Представен е аналитичен израз за модулация на загубите в резонатора под въздействие на нелинейното огледало. Обяснен е механизмът на работа на модулатор на загубите работещ на принципа на промяна на поляризацията на основното лъчение при вътрешнорезонаторна генерация на втора хармонична и е даден аналитичен израз за пропускането на оптичната система. Обсъдени са проблемите и ограниченията при прилагането на тази техника.

*Глава 3* е първата специална глава от дисертацията. Тя е посветена на получаване на режим на синхронизация на модовете в спектралната област около 2  $\mu\text{m}$  използвайки GaSb базиран SESAM и въглеродни нанотръбички като насищаеми погълтители в две различни лазерни конфигурации, и Tm, Ho:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> активна среда. Изборът на Tm-Ho дотирани активни среди и GaSb базиран SESAM е ясно мотивиран. И в двете конфигурации е използвана една и съща активна среда с дължина 3 mm в X-образен резонатор с дължина 1.6 m, възбуждана надлъжно от непрекъснат Ti:сапфир лазер на 802 nm. Активната среда е поставена в шийката на резонаторния мод формиран от две вдлъбнати огледала с радиус 100 mm. SESAM е поставен в едното рамо на резонатора в качеството на глухо огледало, лъчението върху който се фокусира с вдлъбнатото огледало с радиус 100 mm. Лазерният изход се взема от плоско огледало в другото рамо на резонатора. В схемата със SESAM е предвидена възможност за контрол на дисперсията на резонатора с двойка призми от CaF<sub>2</sub>. В схемата с въглеродни нанотръбички, насищаемият абсорбер е поставен в шийка на лазерния мод формиран от друга двойка вдлъбнати огледала.

Проведени са експерименти с четири вида SESAM различаващи си по броя на квантовите ями и дебелината на покриващия слой (водеща до различно време на междузонна/бавна релаксация). Проведено е систематично изследване на зависимостта на продължителността на импулсите и средната мощност на лазера в режим на синхронизация на модовете от параметрите на използваните SESAM. Получена е стабилна самостартираща генерация в режим на синхронизация на модовете с минимална продължителност на импулса 4.2 ps и максимална мощност 150 mW. Изследвана е зависимостта на параметрите на генерация на лазера от тези на SESAM. Получените импулси не са трансформационно ограничени, което е свързано с наличието на чирп на импулсите. Не е установено скъсяване на импулса с въвеждане на вътрешно-резонаторен контрол на дисперсията.

Получена е стабилна самостартираща генерация в режим на синхронизация на модовете и с използване на въглеродните нанотръбички като насищаем абсорбер. Изследвана е зависимостта на продължителността на импулсите и средната мощност на лазера от пропускането на изходното огледало. Получени са трансформационно ограничени импулси с минимална продължителност от 2.8 ps и максимална мощност на лазера от 107 mW. Въвеждането на вътрешно-резонаторен контрол на дисперсията не дава индикации за скъсяване на импулса. Установено е, че използването на въглеродните нанотръбички като насищаем абсорбер води, при съпоставими условия, до генерацията на по-къси импулси, но и на по-ниска средна мощност, в сравнение със SESAM.

*Глава 4* е втората специална глава от дисертацията. Тя е посветена на получаване на режим на синхронизация на модовете в областта около 1  $\mu\text{m}$ , използвайки формиране на  $\chi^{(2)}$ -леща в кристал за генерация на втора хармонична при отстройка от точния фазов синхронизъм. Друга основна цел е да се тества хипотезата за солитонов механизъм определящ стабилността на режима на синхронизация на модовете и параметрите на импулса в този случай. Експериментално са тествани няколко основни зависимости, които са в сила при солитоново формиране на импулсите. Използваната лазерна среда е Nd:YVO<sub>4</sub> поставена в Z-образен резонатор, възбуждана колинеарно от диоден лазер на 808 nm.

Изследвана е зависимостта на продължителността на импулсите от енергията им в резонатора, варирайки честотата на повторение на импулсите и коефициента на пропускане на изходното огледало. Показано е съществуването на реципрочна връзка между продължителност и енергия на импулса, макар и с известно отклонение от линейната зависимост предсказана от солитонната теория. Получени са импулси с продължителност под 5 ps и средна мощност на генерация над 6 W. Получена е и рекордна честота на повторение от 600 MHz за лазери използващи  $\chi^{(2)}$ -леща за синхронизация на модовете.

Проведени са експерименти подкрепящи тезата за солитонов механизъм на формиране на импулсите. Изследвано е влиянието на знака и големината на нелинейността на кристала за втора хармонична върху стабилността на режима на синхронизация на модовете и продължителността на импулсите. Получен е самостартиращ режим на синхронизация на модовете с трансформационно ограничени импулси с продължителност 5.1 ps. Установено е, че променяната на  $\chi^{(2)}$ -лещата от дефокусираща във фокусираща, инвертирайки знака на фазовата разстройка в нелинейния кристал, пречатства режима на синхронизация на модовете при положителна дисперсия в резонатора. В същата посока е интерпретиран и факта, че увеличаването на ефективния нелинеен показател на пречупване на кристала води до скъсяване на импулса и генерация на два и повече импулса. За модово синхронизиран лазер с нелинейна  $\chi^{(2)}$ -леща е получена рекордна средна мощност от 20.1 W при продължителност на импулсите 6.1 ps.

Изяснено е влиянието на разстройката на груповите скорости на основната вълна и втората хармонична върху режима на синхронизация на модовете чрез нелинейна  $\chi^{(2)}$ -леща. Използвайки активна среда Nd:LuYAG с по-широк спектър от този на Nd:YVO<sub>4</sub> са получените импулси с продължителност 2.4 ps. Зависимостта на продължителността на импулса от разстройката от фазовия синхронизъм е в съгласие със солитонния механизъм. За изясняване на потенциала на  $\chi^{(2)}$ -лещата за генериране на свръхкъси импулси е използвана активната среда Yb:YAG с още по-широк спектър. Получените импулси от 1.4 ps са рекордно къси за лазер използващ нелинейна  $\chi^{(2)}$ -леща за синхронизация на модовете.

## II. Достойнства и научни приноси на дисертационния труд.

Основните достойнства на дисертационния труд могат да бъдат обобщени така:

1. Избраната тема е актуална и значима за генерацията на свръхкъси светлинни импулси в диапазона между 1  $\mu\text{m}$  и 2  $\mu\text{m}$ . Демонстрирани и изследвани са различни техники за синхронизация на модовете в тази спектрална област, базирани на GaSb SESAM, въглеродни нанотръбички и нелинейна  $\chi^{(2)}$ -леща. Установени са основни експериментални зависимости характеризиращи режима на работа на лазера в тези случаи.

2. Получени са някои оригинални резултати. За пръв път са сравнени възможностите на GaSb SESAM и въглеродни нанотръбички като насищаеми погълтители за синхронизация на модовете в областта около 2  $\mu\text{m}$ . За пръв път е демонстрирана синхронизация на модовете на Tm-Но базиран лазер, използвайки насищаем погълтител от въглеродни нанотръбички.

3. Получени са някои рекордни резултати за модово синхронизирани лазери с  $\chi^{(2)}$ -леща: 20.1 W средна мощност от Nd:YVO<sub>4</sub> лазер; 1.4 ps продължителност на импулсите от Yb:YAG лазер; 600 MHz честота на повторение на импулсите от Nd:YVO<sub>4</sub> лазер. Лазерното лъчение се характеризира с високо качество на пространствено-временните характеристики на импулса и стабилна по честота и амплитуда серия на импулсите.

4. Дисертационният труд е написан задълбочено и професионално. Авторефератът правилно отразява целите и съдържанието на дисертацията.

5. Основните резултатите от дисертацията са публикувани в две статии в реномирано специализирано научно списание с импакт фактор и са докладвани на 11 конференции. Забелязани са общо 4 независими цитата на трудовете на автора.

6. Личният принос на автора в това колективно изследване очевидно е голям, съдейки по факта, че, с изключение на един доклад на конференция, той е първи автор във всичките приложени публикации.

7. Публикациите са свързани с темата на дисертацията и отговарят на количествените и качествени показатели за присъждане на образователната и научна степен „доктор”.

### III. Критични бележки и препоръки.

Към дисертационния труд могат да се отправят следните бележки:

1. В таблица 1.1, един от параметрите на насищаемия абсорбер,  $F_{\text{sat,A}}$ , е дефиниран като *плътност на енергията* на насищане на поглътителя (имащ мерна единица  $\text{J/cm}^3$ ), докато точният термин трябва да бъде *поток (flux) на енергията* на насищане поглътителя, което съответства на иначе правилната мерна единица,  $\text{J/cm}^2$ , представена в таблицата. Същото важи и за величината  $F_{\text{p,A}}$ , дефинирана като *плътност на енергията* на падащия импулс, вместо *поток на енергията* на падащия импулс.

2. На стр.14, приетата нормировка на квадрата на модула на обвивката (амплитудата) на електрическото поле към мощността, вместо, както е коректно, към интензитета – стр. 5, б, би била вярна ако напречното сечение на импулса не се променя.

3. Във връзка с обсъждания в глава 4 солитонен механизъм, би било полезно да се представят данни за дисперсията на груповата скорост за активната среда и нелинейния кристал. Представената дисперсия на груповото закъснение за целия резонатор е интегрална характеристика и от нея не може да се получи представа за дисперсионната дължина, а оттам - за интензивността на процеса на дисперсия за генерираните импулси в този резонатор.

4. За прецизиране на терминологията, в текста би трябвало да се уточни, че под солитон в случая се има предвид временен солитон.

### IV. Лични впечатления от докторанта

Не познавам лично докторанта, но представеният дисертационен труд и получените резултати говорят за неговата компетентност, задълбочено познаване на изследваната област и потенциал за развитие в научната и преподавателска сфера.

**Заклучение:** Дисертацията е по актуален, ясно формулиран и сложен проблем на лазерната физика. Поставените цели и задачи са изпълнени. Представеният дисертационен труд съответства на изискванията за присъждане на исканата научна степен. Направените критични бележки са от технически характер и по никакъв начин не поставят под съмнение получените впечатляващи резултати. Всичко това ми дава основание да препоръчам най-убедено на членовете на Научното жури да присъдят на докторант Веселин Станимиров Александров образователната и научна степен “доктор”.

Рецензент:

10.10.2016 г.  
София

/ проф. д-р И. Г. Копринков/  
Департамент по приложна физика,  
Технически университет – София