

РЕЦЕНЗИЯ

от член на Научно Жури, доц. д-р Иван Петров Ангелов, ИОХЦФ-БАН

Относно: Дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен „Доктор” по специалност: „Физика на вълновите процеси (вкл. квантова електроника и нелинейна оптика)“

на тема: *„High peak and average power laser oscillators and amplifiers based on Nd, Tm and Ho-doped laser media”* или *„Лазерни генератори и усилватели с висока пикова и средна мощност базирани на Nd, Tm и Ho-дотирани твърдотелни лазерни среди”*

автор на дисертационния труд : **Божидар Николов Орешков -**

докторант към катедра Квантова електроника на Физически факултет при СУ "Св. Климент Охридски", София, България.

Научен ръководител: **доц. д-р Иван Христов Бъчваров**

1. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем в научно и научно-приложно отношение.

От създаването на първите лазери през 1960 г. от Майман до сега лазерите търпят бурно развитие, обусловено от уникалните свойства на лазерното лъчение, даващи възможност лазерите да се използват в различни сфери - от научни изследвания до приложения в индивидуалната ежедневна човешка дейност. С увереност може да се твърди, че лазерите на практика са навсякъде около нас – охранителни системи, баркод скенери, четящи устройства, лазерни принтери, приложения в науката и технологията – като лидари, прецизни медицински уреди, микрообработка и синтез на нови материали, запалване на двигатели с вътрешно горене, термоядрен синтез както и много други.

Използването на лазерите в научната област, в индустрията, в медицината, в цифровите технологии и в други области на човешката дейност се дължи на възможността, посредством използването на различни активни лазерни среди, да се постигнат дефинирани и надеждни параметри на лазерното лъчение – дължина на вълната, разходимост, енергия, мощност, продължителност на импулс, интензивност на лъчението и др. необходими за конкретната област на приложение.

В последните години нараства търсенето и използването на компактни и надеждни лазерни системи, осигуряващи едновременно висока енергия на импулсите (от порядъка на стотици mJ) и голяма пикова мощност ($>10\text{MW}$), при честоти на повторение на импулсите в диапазона 1-1000 Hz (т.е. висока средна мощност) и дифракционно ограничени снопове. Като такива все повече се налагат т.н. диодно наpomпвани твърдетелни лазерни (ДНТЛ) системи.

Основните компоненти на съвременните ДНТЛ системи са надеждни наносекундни лазерни генератори и лазерни усилватели позволяващи усилване на генерираното, с конкретни параметри, лазерно лъчение на няколко порядъка, посредством т.н. техника *MOPA* - *master-oscillator power-amplifier*. Понастоящем в качеството на лазерни генератори широко се използват т.н. микрочипови лазери, работещи в режим на пасивна модулация на доброкачествеността. Те са миниатюрни и надеждни източници, осигуряващи едночестотни, нано- и суб-наносекундни лазерни импулси с висока честота на повторение и дифракционно ограничен сноп в близката инфрачервена област. Преобладаващата част от тези лазерни осцилатори, излъчващи в спектралния диапазон около $1\ \mu\text{m}$ са базирани на Nd^{3+} -дотирани твърдетелни кристални активни среди. В последните години има нарастващ интерес в развитието на Yb^{3+} -дотирани наносекундни лазери поради възможностите, които дават кристалите дотирани с Yb^{3+} за реализиране на генератори и усилватели с различни геометрии на активната среда и със необходимите пространствени характеристики на лазерното излъчване. Едно от алтернативните решения за реализиране на наносекундните системи с висока средна и пикова мощност е генерацията и усилването на така наречените пакети от свръхкъси (пико и фемтосекундни) лазерни импулси с висока честота на повторение. Такава комплексна времева структура на импулсите е подобна на тази, генерирана от лазерите на свободни електрони (ЛСЕ), с тази разлика, че честотата на повторение на пакетите е в диапазона около 1 kHz, вместо няколко десетки Hz. И ако до тук сме сумирали необходимите параметри на лазерите, преимуществено за научни и технологични приложения, то за приложения в областта на медицината, където в редица случаи е необходимо областта на взаимодействието на лъчението с живата материя да се редуцира до микрони и субмикрони, практиката изисква лазерно лъчение в спектралния диапазон 2-3 μm . Такава възможност предоставят активни среди дотирани с Er, Ho, Tm и др. Лазерите излъчващи на дължини на вълните около 2 μm са много интересни и за редица научни и технологични приложения. Понастоящем непрекъснати лазери на 2 μm се използват като стандартна практика в урологията, а импулсни лазери на 2,7 и 2,9 μm в режим на свободна генерация са навлезли мащабно в денталната медицина. Потенциалът за използването им би се увеличил многократно при реализиране на системи генериращи нано- и субнаносекундни импулси, с висока енергия и висока честота на повторение.

От изложеното до тук следва, че така формулираната тема на дисертацията, поставените цели и задачи за решаване с настоящия труд са актуални и целят създаването и изследването на високоефективни и надеждно работещи лазерни източници с възможности за приложения в научни изследвания, в технологията и в медицината.

2. Познава ли дисертантът състоянието на проблема и оценява ли творчески литературния материал?

Анализът на литературния материал, включващ 88 заглавия, публикувани в периода 1960-2015 г. е изложен основно в глава *Introduction* (10 заглавия) – 2 страници и в глава *Laser theory* (9 заглавия) в обем 19 страници. Литературният обзор показва добро познаване на съвременното състояние на проблема, на методите и апаратурата за експериментални изследвания и за обработка на резултатите от изследванията. Преобладаващата част на цитираната литература (69 заглавия) е цитирана в глави от дисертационния труд описващи експериментално реализираните лазерни конфигурации и сравнение на постигнатите лазерни параметри с тези от литературните източници. Като пропуск в обзорната част на дисертацията можем да посочим отсъствието на сравнителни таблици за съвременните достижения по отношение на основни параметри и характеристики на твърдотелни импулсни лазери, реализирани по подобни или сравними схеми с тези представени от дисертанта.

3. Кратка аналитична характеристика на естеството и на достоверността на материала, върху който се градят приносите на дисертационния труд.

Дисертационният труд е представен на 105 страници и съдържа 86 фигури и 7 таблици и се състои от **Въведение** (*Introduction*) и три глави. В увода е направена обосновка за актуалността на проведените експериментални и научни изследвания по време на докторантурата. Първата глава, озаглавена **Теория на лазерите** (*Laser theory*) е разделена на две части. В първата част (2.1) е направен кратък обзор на теорията за генерация на къси лазерни импулси с висока енергия в режим на модулация на доброкачествеността. Разгледани са случаите на импулсно и непрекъснато възбуждане на активната среда, както и аналитични методи за анализ на лазери, работещи в режим на активна и пасивна модулация на доброкачествеността. Приведени са аналитични зависимости за основни параметри на генерираното лъчение- продължителност и енергия на импулса и пространствени характеристики на лъчението. На базата на тях могат да се направят изводи за конкретни реализации на оптимални оптични схеми на лазерните генератори. Втората част (2.2) е посветена на теорията за усилване на лазерни импулси. Тук са разгледани случаите на еднопроходно и много-проходно усилване и са показани изискванията към входния сигнал за постигане на ефективно усилване. В Глава 3. озаглавена **Експерименти за развитие на лазерите** (*Laser development experiments*), са описани в 6 раздела реализираните лазерни конфигурации и получените параметри, който са коментирани в сравнение с получените от други автори резултати. Приведените резултати в графичен и табличен вид, анализа на получените резултати и интерпретирането на условията, необходими за постигането на даден параметър на лазерното излъчване, свидетелстват за това, че резултатите са получени от автора.

В последната глава (Глава 4.) на дисертацията озаглавена **Заклучения и перспективи** (*Conclusions and outlook*) дисертанта е обобщил постигнатите основни резултати от

проведените експериментални и теоретични изследвания по реализация на усъвършенствани схеми на лазерни генератори и комплекси от типа *MOPA* на базата на активни среди дотирани с Nd^{3+} и Tm^{3+} и кодотирани едновременно с Tm^{3+} и Ho^{3+} .

Направените в дисертационния труд изводи и заключения съответстват на получените от дисертанта резултати, а техният брой (поне според мен: на изводите -3 и на приносите -6) е доказателство за качеството на проведените изследвания и за тяхната новост за лазерната техника. Ще трябва обаче да отбележим, че това по-отчетливо е направено в Автореферата на дисертанта, а в самата дисертация тези неща практически не са акцентирани.

Искам да отбележа, че в дадения случай и в рамките на законовите изисквания за изготвяне на рецензия по предоставения дисертационен труд, е много трудно да се обхване пълния обем на представените изследвания и резултати от тях и да се обобщи значението им за прилагането на реализираните лазерни източници в практика. Независимо от това искам да отбележа следните по-важни акценти в работата на дисертанта.

- Проведени са експериментално 6 независими изследователски цикъла за реализация на конкретни оптични схеми както на лазерни генератори, така и на комплекси от типа *MOPA* за генериране на лазерно лъчение в два спектрални диапазона – 1 μm и 2 μm ;
- Реализирани са няколко експериментални лазерни системи с възможности за приложения в научната дейност, а така също и за технологични и медицински приложения;
- Изследвани са в съответствие с изискванията за добрата практика надеждността на реализираните лазери, а така също и стабилността на временните и пространствени им параметрите;
- Разработена е и експериментално е апробирана програма за оптимизация на конструктивните параметри при конструиране на ДНТЛ със зададени характеристики на лазерното излъчване.

4. В какво се заключават научно и научно-приложните приноси представени в дисертационния труд:

Основната значимост на дисертационния труд за науката и практиката е в разработване на високоенергийни лазерни източници на базата на задълбоченото познаване на теорията и практиката на твърдотелните лазери.

1. Разработени са няколко различни вида суб-наносекундни лазерни осцилатори, генериращи на дължина на вълната 1064 нм и работещи в режим на пасивна модулация на доброкачествеността. Всеки от тях генерира импулси с продължителност по-къса от 800 ps, с енергии от 50 до 300 μJ , при висока честота на повторение (до 500 Hz). За всеки е създаден отделен дизайн на осцилатора, с цел да се минимизира влиянието на фактори, влошаващи характеристиките на лазерното лъчение, типични за съответния тип лазер:

- Реализирани са схеми за редуциране на флукуацията в появата на Q-импулса във времето, спрямо напompващия импулс;

- Оптимизирани са оптичните конфигурации за получаване на линейно поляризирано изходно лъчение, запазвайки късата продължителност на импулса и високата енергия;

- Реализирани са генератори на възможно най-къси импулси, запазвайки високата енергия (няколко десетки до няколко стотици микроджаула), при честоти на повторение 500-1000 Hz.

2. За повишаване на енергията от тези осцилатори до нива от порядъка на 1-2 mJ, автора е разработил два надлъжно напompвани предусилвателя, базирани на Nd:YVO₄ и на придобиващите популярност Nd:YAG кристални влакна. Разработена е детайлна процедура за проектиране и конструиране на мощни напречно-диодно напompвани лазерни усилвателни модули. На базата на тези модули са създадени няколко различни лазерни системи:

- С цел елиминиране на необходимостта от предусилвател успешно е разработена четирипроходна усилвателна схема, при която енергията на вход 0.3 mJ достига до енергия на изхода на системата 18 mJ, с продължителност на импулсите 800 ps, при 500 Hz и дължина на вълната 1064 nm;

- С цел получаване на къси лазерни импулси (<15 ns), с много висока енергия (>10 mJ), за пръв път е демонстрирана работа на напречно-диодно напompван Nd:YAG модул в комбинация с нестабилен резонатор и огледало с променлив профил на отражение работещи при висока средна мощност (честота на повторение 1 kHz).

3. В процеса на работа на дисертанта е създаден усилвател на пакети от свръхкъси лазерни импулси. За пръв път е демонстрирана работа при честота, по-висока от 50 Hz (в случая 500 Hz), на система, генерираща импулси с този тип времева структура и наподобяваща структурата на импулсите при ЛСЕ. Системата генерира пакети (макро-импулси) с пренастройваема продължителност (10-100 μ s), състоящи са от пикосекундни микро-импулси (6.8 ps, продължителност, разделени на 11 ps един от друг). Енергията на изхода на системата достига 15.1 mJ за 10 μ s пакет, и 43.1 mJ за 100 μ s пакет.

4. Използвани са нови пиезоелектрични деформируеми огледа за демонстриране възможностите за редуциране влиянието на термично индуцираните изкривявания, характерни за твърдотелните лазерни усилватели с висока средна мощност и водещи до влошаване пространствените характеристики на лазерния сноп.

5. Изследвани са възможностите на диодно напompвани, твърдотелни лазерни среди, базирани на Tm³⁺-дотирани и Tm³⁺, Ho³⁺-кодотирани лазерни среди, за генерация на лазерни импулси с висока енергия и висока пикова мощност в спектралния диапазон около 2 μ m. Реализирани са конструкции на такъв тип лазерни източници и успешно е демонстрирана генерация на няколко различни лазерни осцилатора:

- Използван е кристал Tm:LLF в комбинация с Cr:ZnSe насищаем поглъtitел, за постигане на най-късите импулси генерирани от диодно напompван Tm-базиран лазер, работещ в режим на пасивна Q-модулация – 5.6 ns, с енергия достигаща 1.65 mJ, при честоти от няколко стотин Hz, на дължина на вълната 1890 nm.

- При използването на Cr:ZnSe като насищаем погълтател, за пръв път е получена генерация в режим на Q-модулация в новата лазерна среда Tm:GLF. Генерирани са 13 ns импулси, с енергия 0.44 mJ при честота на повторение 290 Hz и 1876 nm дължина на вълната.

- При използването на ко-дотираната лазерна среда Tm,Ho:YLF, в комбинация с Cr:ZnSe насищаем погълтател, за пръв път са получени къси лазерни импулси от такъв тип лазер. Продължителност – 45 ns, енергия 33 μ J, 0.73 kW пикова мощност, при честоти на повторение между 600 и 3400 Hz.

6. Детайлно е изследван потенциала на различни от стандартните Cr²⁺-дотирани II-VI полупроводници в качеството на пасивни затвори за лазерната техника. Измерени са плътността на енергията на насищане, както и сеченията за поглъщане от основно и възбудено състояние на материала Cr:CdTe.

5. Преценка на публикациите по дисертационния труд: брой, характер на изданията, в които са отпечатани.

Резултатите, изложени в дисертацията, са публикувани в две статии в списания с импакт фактор: една публикация в IEEE Photonics Journal (импакт фактор (ИФ) - 2.177) и една публикация в Laser Physics Letters (ИФ - 2.391). Резултатите от дисертацията са докладвани в десет материала на 6 международни конференции в т.ч. *CLEO Europe*, *CLEO USA*, *FiO – Frontiers in Optics – Laser Science* и публикувани в OSA Technical Digest (online) и IEEE Xplore digital library. Има също така и седем доклада на 4 регионални европейски конференции.

От направената справка са забелязани 2 независими цитирания.

Докторантът има и съществено участие в научно-изследователската дейност на Физ. факултет на СУ“Св. Кл. Охридски“. Участвал е в разработването на 9 научни проекта, всички финансирани от Фонд научни изследвания на МОН.

Като препоръка към дисертанта може да се отнесе констатирането на факта, че на фона на получените значими и нови за лазерната техника и практика резултати и отразени в представената дисертация, броят на публикациите по темата в периодичните издания е малък. Желателно е дисертантът да положи в близко време усилия и те да се публикуват в реномирани списания .

Заклучение

От текста на дисертационния труд “ „*High peak and average power laser oscillators and amplifiers based on Nd, Tm and Ho-doped laser media*” или „*Лазерни генератори и усилватели с висока пикова и средна мощност базирани на Nd, Tm и Ho-дотирани твърдотелни лазерни среди*”, от представените публикации и участия в научни мероприятия, се вижда, че поставените задачи са изпълнени и целите на изследването са постигнати. Основните изводи и приносите, за които докторантът претендира в заключението, отговарят напълно на представените в дисертационния труд резултати.

Авторефератът е написан според изискванията и съдържа основните резултати и приноси на докторанта.

Дисертационният труд отговаря напълно на изискванията на Закона за Развитие на Академичния Състав в Република България и Правилника за неговото приложение и на съответните правилници на СУ „Св. Кл. Охридски“- София за присъждане на образователната и научна степен ДОКТОР.

На базата на представения за защита материал и значението на приносите на докторанта препоръчвам на Научното жури, назначено със заповед на Ректора на СУ „Св. Кл. Охридски“, София да присъди на магистър **Божидар Николов Орешков** образователната и научна степен „**Доктор**“ по научна специалност **4.1- „Физика на вълновите процеси вкл. квантова електроника и нелинейна оптика“** за което убедено ще гласувам положително.

02 октомври 2016 г.

доц. д-р Иван Ангелов: