

Софийски Университет “Св. Климент Охридски”

Физически Факултет

---



## АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация в изпълнение на изискванията за придобиване на  
образователна и научна степен доктор

на Божидар Николов Орешков,

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**

Научен ръководител: Доц. Д-р Иван Христов Бъчваров

---

София, 2015

**Данни за дисертационния труд:**

Брой страници: 103

Брой фигури: 86

Брой таблици: 7

Брой на цитирани литературни източници: 88

Брой публикации на автора по темата на дисертацията: 2

Брой доклади на международни конференции: 9

Брой независими цитати на статиите по дисертацията към 29.06.2015 г.: 1

**Съдържание**

I. Обща характеристика на дисертационния труд .....	1
1. Актуалност на темата .....	1
2. Цел и задачи на дисертационната работа.....	2
3. Научна новост и принос на автора .....	3
4. Публикации.....	4
5. Обем и структура на дисертацията .....	5
II. Кратко изложение на дисертационния труд .....	6
1. Лазери работещи в режим на модулация на доброкачествеността .....	6
2. Лазерни усилватели .....	8
3. Експериментална резултати .....	10
III. Списък на публикации и доклади на научни конференции свързани с дисертацията.....	34
IV. Литература.....	36

# I. Обща характеристика на дисертационния труд

## 1. Актуалност на темата

Още от създаването си през 1960 г. от Майман [1] до ден днешен, лазерите търпят бурно развитие. Благодарение на уникалните свойства на лазерното лъчение, те намират приложения в много различни сфери, от всекидневието на човек, до най-новите научни открития. Стартирайки от приложения, като ежедневно използваните баркод скенер, компакт диск и лазерен принтер и стигайки до приложения на границите на науката и технологията, като Лидари [2], прецизни медицински приложения [3], микрообработка [4] и синтез на нови материали, запалване на двигатели с вътрешно горене [5], термоядрен синтез [6], детектирания на гравитационни вълни [7], както и много други, лазерите на практика са навсякъде около нас.

В множество от изброените научни и индустриални приложения е необходимо да се използват компактни и надеждни лазерни системи, осигуряващи едновременно висока енергия (от порядъка на десетки до стотици mJ) и голяма пикова мощност (>10MW), при честоти на повторение на импулсите в диапазона 0,5 – 1 kHz (висока средна мощност) и дифракционно ограничени снопове. Въпреки, че това е много интересен и дискутиран научен проблем и доста изследвания и разработки са правени през последните години, все още в голяма част от комерсиално достъпните kHz ns-лазерни системи, изходната енергия не надхвърля няколко десетки mJ, докато при системите с висока енергия в импулс, честотата на повторение не надхвърля 100 Hz. Освен това в голяма част от високо енергетичните системи, изходното лъчение не е с единичен напречен (TEM<sub>00</sub>) или надлъжен мод.

Две са ключовите компоненти на такива диодно напompвани твърдотелни лазерни (ДНТЛ) системи, които трябва да бъдат изследвани – надеждни наносекундни лазерни осцилатори и мощни лазерни усилватели. В последните години микрочипови лазери, работещи в режим на пасивна модулация на доброкачествеността се доказват все повече, като прости, миниатюрни и надеждни източници, осигуряващи едночестотни, суб-наносекундни лазерни импулси с висока честота на повторение и дифракционно ограничен сноп в близката инфрачервена област [8]. Преобладаващата част от тези лазерни осцилатори, излъчващи в спектралния диапазон около 1 μm са базирани на добре установените Nd<sup>3+</sup>-дотирани

активни среди. Въпреки това, в последните години има нарастващ интерес в развитието на  $\text{Yb}^{3+}$ -дотирани наносекундни лазери. Същото може да бъде казано и за мощните лазерни усилватели. Макар че за получаване на висока енергия, висока пикова и средна мощност Nd-базирани усилватели в геометрия с пръчка или тънък блок, са стандартния избор, Yb-базираните усилватели започват да стават все по-добра алтернатива, особено в геометрия с тънък диск.

Алтернативно решение на наносекундните системи с висока средна и пикова мощност е генерацията и усилването на така наречените пакети от свърхкъси (пико и фемтосекундни) лазерни импулси с висока честота на повторение. Такава комплексна времева структура на импулсите е подобна на тази, генериран от лазерите на свободни електрони (ЛСЕ), с тази разлика, че честотата на повторение на пакетите в диапазона около 1 kHz, вместо няколко десетки Hz [9].

Нуждата от лазерни системи генериращи едновременно висока енергия, висока пикова и средна мощност не е ограничена до спектралния диапазон около 1  $\mu\text{m}$ . Лазерите излъчващи на дължини на вълните около 2  $\mu\text{m}$  са много интересни за редица научни и технологични приложения [10]. Макар че непрекъснати лазери на 2  $\mu\text{m}$  се използват като стандартна практика в урологията например, лазери генериращи няколко наносекунди, с висока енергия и средна мощност, тепърва започват да навлизат.

## 2. Цел и задачи на дисертационната работа

Целта на настоящата работа е разработване на ***създаване на лазерни системи генериращи едновременно висока енергия, висока средна и пикова мощност, както в спектралния диапазон около 1  $\mu\text{m}$ , така и в този около 2  $\mu\text{m}$ .***

По конкретно задачите могат да се формулират като:

- Разработване лазерни осцилатори генериращи къси лазерни импулси с висока енергия и средна мощност, базирани на Nd-дотирани среди.
- Разработване на методика за конструиране на напречно-диодно възбудани усилвателни модули, базирани на Nd-дотирани среди. Разработване на мощни усилватели, използвайки конструираните модули.
- Разработване лазерни осцилатори генериращи къси лазерни импулси с висока енергия и средна мощност, базирани на диодно напompвани Tm-дотирани и Tm, Ho-кодотирани твърдотелни лазерни среди.

### 3. Научна новост и принос на автора

Разработени са няколко различни вида суб-наносекундни лазерни осцилатори, генериращи на дължина на вълната 1064 nm 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  $\mu\text{J}$ , при висока честота на повторение (до 500 Hz). За всеки е създаден отделен дизайн на осцилатора, с цел да се минимизират различни проблеми типични за такъв тип лазер:

- Редуциране на флукутиацията в появата на Q-импулса във времето, спрямо напompващия импулс;
- Получаване на линейно поляризирано изходно лъчение, запазвайки късата продължителност на импулса и високата енергия;
- Генериране на възможно най-къси импулси, запазвайки високата енергия (няколко десетки до няколко стотици микроджаула), при честоти на повторение 500-1000 Hz.

За повишаване на енергията от тези осцилатори до нива от порядъка на 1-2 mJ, бяха разработени два надлъжно напompвани предусилвателя, базирани на Nd:YVO<sub>4</sub>, на тепърва придобиващите популярност Nd:YAG кристални влакна.

Беше разработена детайлна процедура за проектиране и конструиране на мощни напречно-диодно напompвани лазерни усилвателни модули. Като използвайки тези модули бяха създадени няколко различни лазерни системи:

- С цел елиминиране на необходимостта от предусилвател беше успешно разработена четирипроходна усилвателна схема, като стартирайки от вход 0.3 mJ енергията на изхода на системата достигна 18 mJ, с продължителност на импулсите 800 ps, при 500 Hz, 1064 nm;
- С цел получаване на къси лазерни импулси (<15 ns), с много висока енергия (>10 mJ), за пръв път беше демонстрирана работа на напречно-диодно напompван Nd:YAG модул в комбинация с нестабилен резонатор, използвайки огледало с променлив профил на отражение, при висока средна мощност (при честота на повторение 1 kHz).

Беше създаден усилвател на пакети от свръхкъси лазерни импулси. Като за пръв път беше демонстрирана работа при честота, по-висока от 50 Hz (в нашия случай 500 Hz), на система, генерираща импулси с такъв тип времева структура – наподобяваща тази на ЛСО. Като системата генерираше пакети (макро-импулси) с

пренастройваема продължителност (10-100  $\mu\text{s}$ ), състоящи са от пикосекундни микроимпулси (6.8 ps, продължителност, разделени на 11 ns един от друг). Като енергията на изхода на системата достигна 15.1 mJ (за 10  $\mu\text{s}$  пакет), и 43.1 mJ (за 100  $\mu\text{s}$ ).

Използвайки тепърва навлизащите пиезоелектрични деформируеми огледа, беше успешно демонстрирано редуциране на влиянието термично индуцираните изкривявания, типични за лазерните усилватели в висока средна мощност.

Бяха изследвани възможностите на диодно наpomпвани, твърдотелни лазерни среди, базирани на  $\text{Tm}^{3+}$ -дотирани и  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ -кодотирани лазерни среди, за генерация на лазерни импулси с висока енергия и висока пикова мощност в спектралния диапазон около 2  $\mu\text{m}$ . Като бяха конструирани и успешно беше демонстрирана генерация на няколко различни лазерни осцилатора:

- Използвайки  $\text{Tm}:\text{LLF}$  в комбинация с  $\text{Cr}:\text{ZnSe}$  насищаем погълтател, бяха постигнати най-късите импулси постигнати диодно наpomпван  $\text{Tm}$ -базиран лазер, работещ в режим на пасивна Q-модуляция – 5.6 ns, с енергия достигаща 1.65 mJ, при честоти от няколко стотин Hz, на дължина на вълната 1890 nm.
- Използвайки  $\text{Cr}:\text{ZnSe}$  като насищаем погълтател, за пръв път беше получена генерация в режим на Q-модуляция с относително новата лазерна  $\text{Tm}:\text{GLF}$  – 13 ns импулси, с енергия 0.44 mJ, на честота 290 Hz и 1876 nm дължина на вълната.
- Използвайки ко-дотираната лазерна среда  $\text{Tm, Ho}:\text{YLF}$ , в комбинация с  $\text{Cr}:\text{ZnSe}$  насищаем погълтател, за пръв път бяха получени къси лазерни импулси с такъв тип лазер – 45 ns продължителност, енергия 33  $\mu\text{J}$ , 0.73 kW пикова мощност, при честоти на повторение между 600 и 3400 Hz.
- Детайлно беше изследван потенциала на различни от стандартните  $\text{Cr}^{2+}$ -дотирани II-VI полупроводници. Успешно бяха измерени плътността на енергията на насищане, както и сеченията за поглъщане от основно и възбудено състояние на материала  $\text{Cr}:\text{CdTe}$ .

#### 4. Публикации

Резултатите от работата по 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. Участие във всички големи международни научни конференции в областта през последните четири

години (CLEO, CLEO Europe, Frontiers in Optics), както и на други по-малки прояви на местно и международно ниво . С общо 9 доклада.

## **5. Обем и структура на дисертацията**

Дисертационният труд е представен на 105 страници, с изчерпателно описание на свършената работа и получените резултати. Работата съдържа 86 фигури и 7 таблици, като са цитирани 88 литературни източника.

Дисертационният труд се състои от увод, обща част с обзорен характер, специална част, съдържаща основните експерименталните резултати, заключение, списък с използваната литература и списък на публикации и доклади на научни конференции по темата на дисертацията.

В глава 2.1 от общата част 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.

В глава 2.2 е теорията за усилване на лазерни импулси, като са разгледани случаите на еднопроходно и много-проходно усилване и са показани изискванията към входния сигнал за постигане на ефективно усилване.

Специалната част (глава 3) е разделена на 6 секции, в които подробно са описани основните експериментални резултати от работата по дисертацията.

## II. Кратко изложение на дисертационния труд

### 1. Лазери работещи в режим на модулация на доброкачествеността

За генерация на лазерни импулси с висока пикова мощност съществуват няколко режима на работа на лазерните осцилатори – режим на модулация на доброкачествеността (Q-модулация), синхронизация на модовете, разтоварване на резонатора и режим на превключване на усилването. От тези най-често използваният метод за генерация на импулси с висока енергия, в комбинация с висока пикова и висока средна мощност е режимът на Q-модулация. Това е техника, при която се управлява доброкачествеността на лазера, която се изразява с Q-фактора. Той се дефинира, като отношението на запасената в активната среда енергия  $E_{st}$  към загубената енергия  $E_d$  за един цикъл:

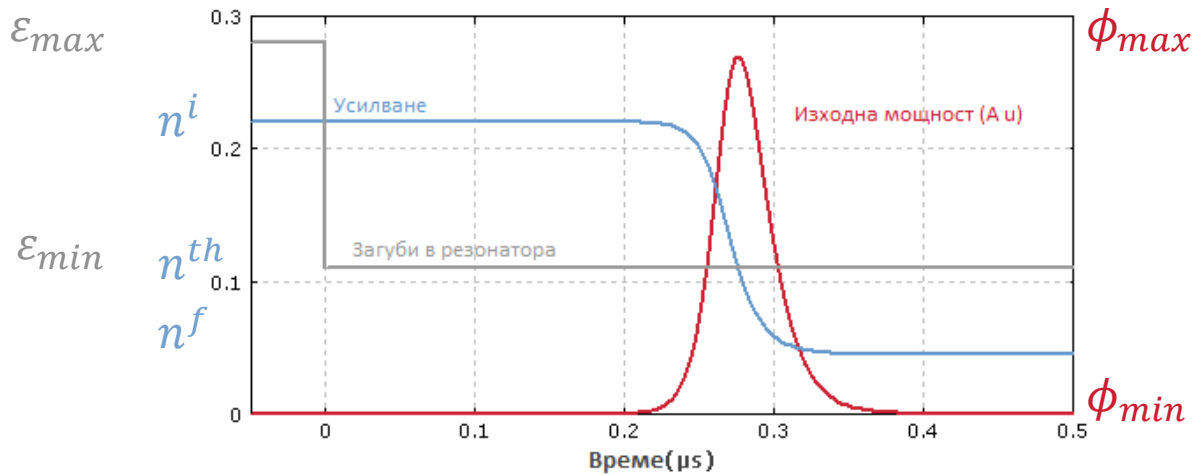
$$Q = 2\pi \frac{E_{st}}{E_d} = 2\pi\nu_0\tau_c \quad (\text{II.1})$$

където  $\omega_0 = 2\pi\nu_0 = 2\pi/T_0$ , а времето на живот на фотона в резонатора се изразява с  $\tau_c = t_r/(T + \delta) = 2L/c(\ln R_1R_2 + \delta)$ , и  $t_r = 2L/c$  е времето за двоен обход на резонатора [11].

Принципът на работа на режима на Q-модулация се състои в натрупване на енергия в активната среда, докато качествения фактор (Q-фактор) на резонатора е намален, за да се предотврати генерация. Въпреки, че натрупаната енергия и усилването в активната среда са много високи, загубите в резонатора са също високи, така условията за генерация са нарушени и инверсната населеност достига ниво, по-високо от праговото. Времето, за което енергията може да бъде съхранена, е от порядъка на времето на живот на горното лазерно ниво. Когато високият Q-фактор на резонатора бъде възстановен, натрупаната енергия в активната среда се освобождава под формата на много кратък светлинен импулс.

На Фигура 1 е показано формирането на импулса във времето. Лазерната генерация е предотвратена от ниския Q-фактор. Към края на напompващия импулс, когато инверсната населеност е достигнала максималната си стойност, Q-факторът се увеличава. В този момент започва нарастването на фотонния поток и се излъчва лазерният импулс. Както се вижда от фигурата, излъчването на импулса не става моментално, защото е нужно време той да се зароди от шума.





**Фигура 1.** Диаграма на формирането на импулса в режим на Q-модуляция.

Редица важни характеристики на Q-модулирания импулс, като например пикова мощност, продължителността на импулса и времето за формиране на импулса, могат да бъдат определени, решавайки скоростните уравнения за плътността на фотоните в резонатора и инверсната населеност в активната среда, които могат да бъдат написани по следния начин:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi c n \sigma \frac{l}{L} - \phi \frac{\varepsilon}{t_r} \quad (\text{II.2})$$

и

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma n \phi \sigma c \quad (\text{II.3})$$

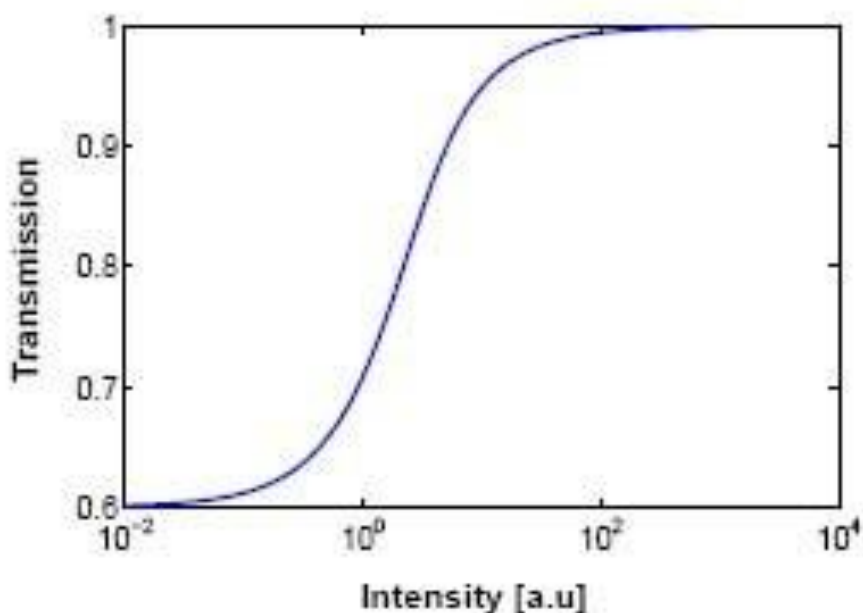
където  $l$  е дължината на активната среда,  $L$  е дължината на резонатора, а с  $\varepsilon$  се отбелязват всички загуби в резонатора:

$$\varepsilon = -\ln R + \delta + \zeta(t) \quad (\text{II.4})$$

Като в този израз  $-\ln R$  представляват полезните загуби (изхода от огледалото с коефициент на отражение  $R$ , а  $\delta$  са дисипативните загуби и  $\zeta(t)$  е функция зависеща от времето, която описва резонаторните загуби внесени от механизма на Q-модуляция.

Методите или механизмите за осъществяване на Q-модуляция могат да се разделят на два основни типа – активни и пасивни. При активната Q-модуляция загубите се контролират чрез активно контролирани устройства. Най-често това са електро-оптични или акусто-оптични модулатори, базирани съответно на електро-оптичния ефект – ефект на Покемс (използвайки електро-оптичен елемент (кристал

или течност), който става двулъчепречупващ под въздействие на външно електрично поле) или на фото-еластичния ефект (взаимодействието на светлината с акустичните вълни, разпространяващи се в подходяща оптична среда). При пасивната Q-модулация загубите се модулират автоматично, използвайки някакъв вид насищаем поглъtitел – дотиран кристал или органично багрило. Такъв тип материали имат ниско пропускане за лазерната дължина на вълната, при ниски плътности на енергията, циркулираща в резонатора, а при високи плътности на енергията, материалът се насища (поглъtitеля се просветлява), което води до високо пропускане и съответно ниски загуби – Фигура 2. В този случай импулс се излъчва веднага щом запасената, в активната среда, енергия достигне достатъчно високо ниво, така че да насити абсорбера.



**Фигура 2** Нормализирано пропускане на насищаем поглъtitел, като функция на енергията на насищане  $E_S$  на материала.

## 2. Лазерни усилватели

Мощността или енергията, излизаща от осцилатор със специфични пространствени, времеви или спектрални характеристики може да се увеличи като се добавят едно или повече усилвателни нива към лазерната система. Главната функция на усилвателя е да увеличи яркостта на петното. Усилването на средната или импулсна мощност, идваща от осцилатора може да се осъществи по няколко различни метода: включващи система от вида задаващ генератор и мощен усилвател (МОРА). При тази архитектурна концепция проектирането на осцилатора

се прави с оглед постигане на конкретни пространствени и времеви параметри на лазерното лъчение, след което то се подлага на едно или няколко степенно усилване в конкретни конфигурации с цел получаване на високи енергии и средни мощности.

Изборът на конкретната схема на усилване зависи от нивата на входната енергия на лазерния импулс, спектралните и времевите характеристики на входния сигнал, както и от желаните изходни мощности или енергии. За ефикасно извличане на енергията от импулсния усилвател, плътността на енергията на входния сигнал трябва да бъде близка до плътността на насищане за дадения лазерен материал. Затова при по-високи честоти на повторение, където средната мощност нараства и термичните ефекти стават значими се използва МОРА архитектурата. Най-добрия пример е усилването на импулси, генерирани от лазерния осцилатор, работещ в режим на модулация на доброкачествеността (Q-импулси) в kHz- обхват.

Ако нивата на енергията, идваща от осцилатора са много ниски, са нужни много проходи през усилвателя, за да може голяма част от запасената енергия да се освободи. Ниско енергийните импулси, генерирани от осцилатор в режим на синхронизация на модовете, обикновено се усилват в регенеративни усилватели. Регенеративният усилвател има огледало от всеки край, както при осцилаторите, но той се напмпва с енергии под прага на генерация. Появява се импулс в усилвателя, който прави много проходи преди да бъде изведен от електро-оптичния модулатор. Тоест характеристика на регенеративния усилвател е наличие на резонатор и от там на модова структура. Следователно при използване на схеми на устойчиви резонатори в регенеративен осцилатор максималната получена енергия се определя от максималния достижим обем на едномодово лъчение без да се постигне оптичен пробив. Пример за типична стойност на достижимата енергия е от порядъка на 1-2 mJ. .

Мощните Nd:YAG лазери, работещи в непрекъснат режим (няколко стотин вата или няколко киловата), се нуждаят от няколко напмпващи модула, тъй като има ограничение на кристалите, с които разполагаме, както и проблеми като охлаждане и двулъчепречупване. Всички модули могат да бъдат поставени в един общ резонатор, формирайки един осцилатор или могат да бъдат използвани в МОРА конфигурация. В повечето случаи има по-голямо преимущество, ако усилвателните модули се поставят на серии в един резонатор, защото това позволява лъчението да минава по няколко пъти през всяка от активните среди.

При създаването на един лазерен усилвател трябва да се вземат под внимание следните показатели:

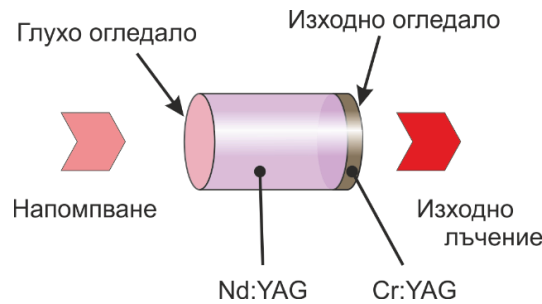
- Коефициент на усилване и ефективност по отношение на отнемане от запасената в лазерната среда енергия.
- Загуби на инверсна населеност вследствие на обратна връзка, която може да доведе до паразитни осцилации или отнемане на инверсна населеност вследствие на усилване на спонтанната емисия .
- Потенциални повреди по повърхностите или корпуса. Прекомерната енергия или мощност върху различни оптични елементи от усилвателя, дифракционни ефекти или самофокусиране, могат да доведат до оптичен пробой.
- Фронта на вълната и продължителността на импулса, влизащи в усилвателя.

### **3. Експериментална резултати**

В тази глава ще бъдат описани на кратко резултатите постигнати с лазерните източници разработени в процеса на изследванията, свързани с темата на дисертацията.

#### **Задаващи осцилатори генериращи наносекундни и суб-наносекундни импулси в диапазона около 1 $\mu\text{m}$ .**

Първата логична стъпка в процеса на работа беше да се стартира със задаващия осцилатор. Стандартният подход за получаване на суб-наносекундни лазерни импулси с енергия от няколко десетки, до няколко стотин микроджаула е пасивната Q-модулация. Насищаемият поглъtitел е компактно устройство, което по принцип не се нуждае от допълнителни механизми за контрол. Това позволява създаването на много къси резонатори и съответно малки и относително евтини лазерни устройства, най-често наричани микрочипови лазери [8] – показани на Фигура 3.

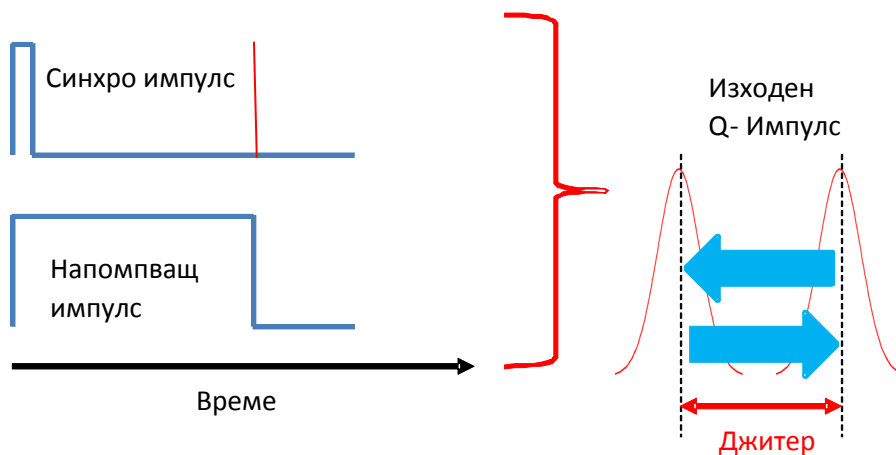


**Фигура 3** Схема на микрочипов лазер, работещ в режим на пасивна Q-модуляция.

Въпреки че микрочиповите лазери имат множество преимущества, те имат и няколко важни недостатъка, като например флуктуации в енергията на Q-импулса, флуктуации в поляризацията и във времето на появата на Q-импулса спрямо напомпващия оптичен импулс. Именно върху минимизирането на тези флуктуации беше наблегнато при проектирането на задаващите осцилатори.

### **Nd:YAG/Cr:YAG задаващ осцилатор с редуциране на времевия „джитер“.**

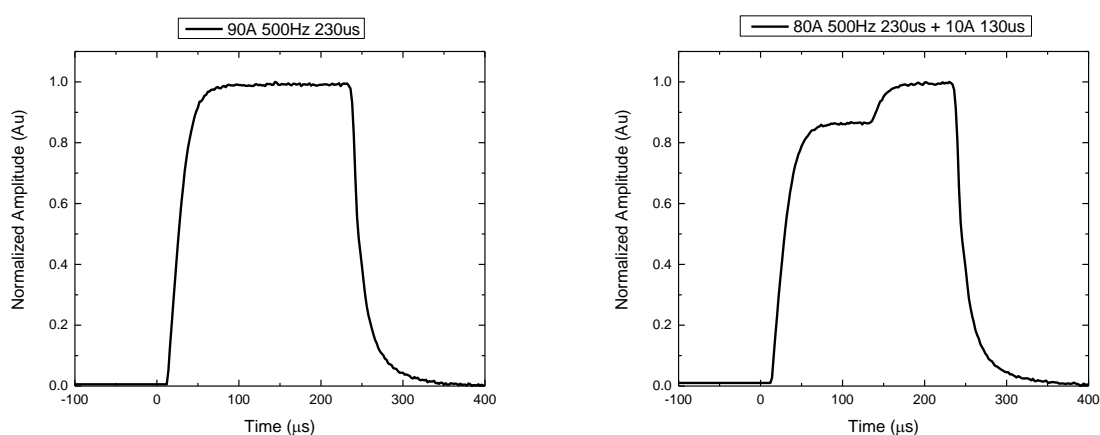
За много приложения е важно появата на лазерния импулс, на лазерната система, във времето, спрямо напомпващия светлинен импулс или някакъв външен синхронизационен сигнал, да бъде много точно определено – Фигура 4. Или с други думи да има малък времеви „джитер“. Освен ако не са взети специални мерки, в лазерите работещи в режим на пасивна Q-модуляция, този „джитер“ е голям [12] – типично няколко единици микросекунди.



**Фигура 4** Времеви „джитер“ от импулс до импулс – поява на Q-импулсите спрямо външен синхронизационен сигнал.

Няколко различни фактора влияят върху тази стойност, като например вариации в интензитета на напомпване, промени в пространствените или спектрални характеристики на напомпването и други [13]. С други думи всички фактори, които влияят върху условието за праг на генерация, могат да доведат до

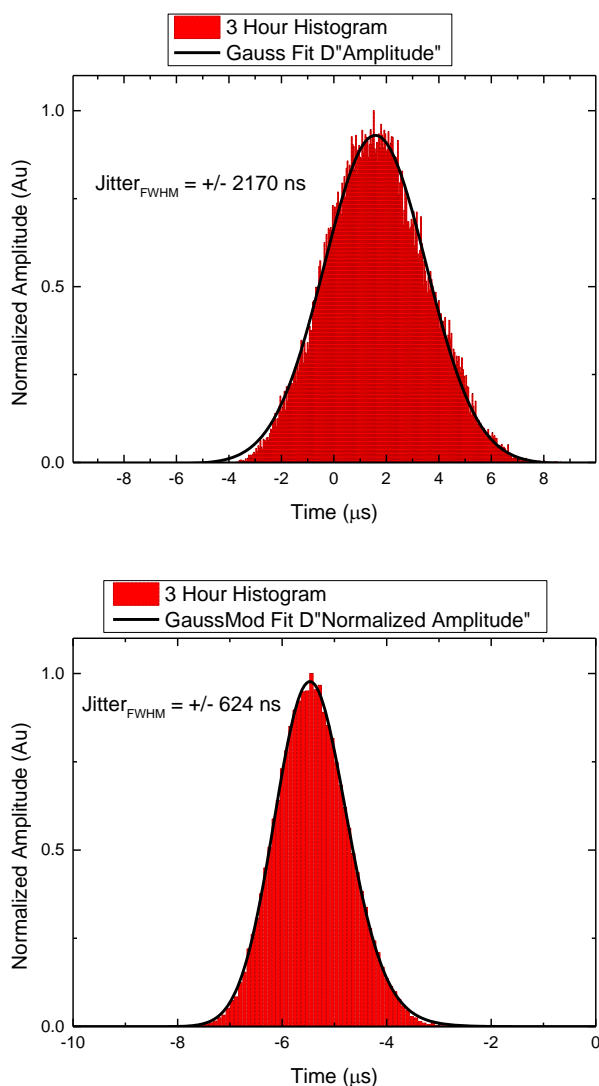
промяна в появата на Q-импулса спрямо напомнимания. Използването на импулсно напомнимане води до малко редуциране на времевия „джитер“, в сравнение с непрекъснато напомнимане. За допълнително редуциране е необходимо да се използват допълнителни техники. Една от тях е чрез контрол на загубите в резонатора, директно просветлявайки насищаемия погълтател. Но типично това става с помощта на външен лазер (лазерен диод на 1036 nm [13] или на друга дължина на вълната), което до голяма степен усложняване на система. Алтернативна и по-лесна за реализация техника е чрез директен контрол на усилването в резонатора, използвайки композитен напомнимащ импулс [14], вместо стандартен правоъгълен импулс – Фигура 5.



**Фигура 5** Стандартен (ляво) и композитен (дясно) напомнимащ импулс.

Микрочиповият лазер, използван в този експеримент е дифузно слепен Nd:YAG/Cr:YAG, с апертура 3 mm в диаметър и дължина 6 mm (4 mm Nd<sup>3+</sup>-дотиран и 2 mm Cr<sup>4+</sup>). Началното поглъщане на Cr:YAG абсорбера е  $T_0 = 30\%$ , отражението на изходното огледало –  $R = 30\%$ . Надлъжното напомнимането на микрочиповия лазер се извършва от диоден лазер (Jenoptik Laser GmbH, JOLD70-QPXF-1L – NA=0.22, 600  $\mu\text{m}$  диаметър на сърцевината) с дължина на вълната 808 nm, куплиран в оптично влакно. Диодният лазер е опериран в квази-стационарен режим на работа, като продължителността на захранващите токови импулси е 230  $\mu\text{s}$  при честота на повторение 0.5 kHz. Неговото лъчение е фокусирано в активната среда с помощта на обектив от 2 лещи – сферична колимираща леща с фокусно разстояние  $f = 60\text{ mm}$  и асферична фокусираща с  $f = 30\text{ mm}$  – 300  $\mu\text{m}$  диаметър на напомнимането. Лазерна генерация е постигната при  $\sim 4\text{ mJ}$  напомнимаща енергия, с 180  $\mu\text{J}$  изходна енергия на 1064 nm. Продължителността на импулс е измерена с помощта на InGaAs свръхбърз (Alphas GmbH UPD-70-IR2-P) в комбинация с 4 GHz

дигитален осцилоскоп (Tektronix CSA7404), и тя беше 524 ps. Използването на композитен напомпващ импулс доведе до редуциране на времевия „джитер“ от  $\pm 2.17 \mu\text{s}$ , при стандартния напомпващ импулс до  $\pm 625 \text{ ns}$  – Фигура 6.



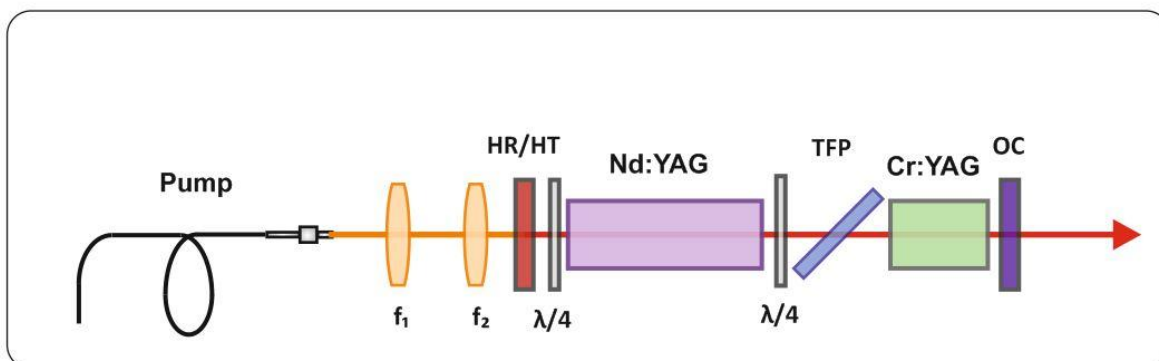
**Фигура 6** Времеви „джитер“ използвайки стандартен (горе) и композитен (долу) напомпващ импулс.

### **Nd:YAG/Cr:YAG микролазер, в схема с линейно поляризиран изход.**

Поради късата дължина на резонатора, микрочиповите лазери типично генерират единичен надлъжен и напречен мод, а двете ортогонални поляризации в резонатора напълно корелират и на практика се борят за едно и също усилване. Когато първият осцилира, той на практика сваля цялата инверсна населеност и вторият не достига генерация [15]. При материали с кубична симетрия като Nd:YAG обаче, това не е изпълнено. Ето защо в такива системи често се наблюдава

флукутиране на енергията между двете ортогонални поляризации, което е нежелан ефект. За да бъде това избегнато могат да се използват няколко различни техники. Една от тях е чрез прилагане на механично напрежение по една от осите на резонатора. Този стрес води до намаляване на прага на генерация за едната от двете поляризации, спрямо другата и на практика фиксира поляризацията на лазера. Друг подход е използването на поляризационен елемент в резонатора. Това очевидно е неприложимо за дифузно слепени микрочипови лазери. Въпреки това ако се използват миниатюрни елементи, така че да се запази малката дължина на резонатора, тази техника също може да бъде използвана за фиксиране на изходната поляризация на осцилатора.

В този експеримент е избран вторият подход, като схемата, която е използвана е така наречения “twisted mode” резонатор [16], показана на Фигура 7. Ключовите компоненти в тази схема са две  $\lambda/4$  вълнови пластини, между които е поставен активният елемент (Nd:YAG,  $3 \times 3 \times 10 \text{ mm}^3$ , 0.6% at.). Бързите оси на двете вълнови пластини са завъртени на  $90^\circ$  една, спрямо друга и на  $45^\circ$  спрямо вътрешно-резонаторния поляризатор, поставен по ъгъл на Брюстер. Насищаемият погълтител е Cr:YAG ( $2 \times 3 \times 2.5 \text{ mm}^3$ ,  $T_0 = 50\%$ ). Двете огледала на резонатора са плоски, едното от които е на помпващо (HR@ 1064 nm, HT@ 808 nm), а другото изходно с  $R = 50\%$ . Дължината на резонатора е 17 mm. Надлъжното на помпване е реализирано, използвайки квази-непрекъснат лазерен диод, с дължина на вълната 808 nm, 400  $\mu\text{m}$  диаметър на сърцевината на оптичното влакно, 200  $\mu\text{s}$  продължителност на на помпващите импулси, работещ на 500 Hz честота на повторение. При на помпване от 5.4 mJ, беше получен линейно поляризиран изход с 300  $\mu\text{J}$  енергия в импулс и продължителност 710 ps.

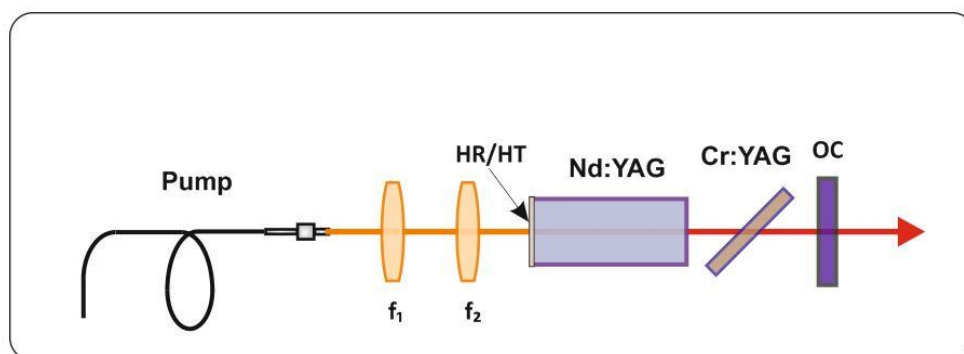


**Фигура 7** Схема на микролазер, използващ “twisted mode” резонатор.



**Nd:YAG/Cr:YAG микролазер, генериращ импулси с продължителност 300 ps.**

Типично най-късите импулси получавани от Nd:YAG/Cr:YAG микрочипови лазери са между 200 и 400 ps, но изходната енергия не надвишава 15  $\mu\text{J}$  [17, 18]. За да се получи по-висока изходна енергия в такъв тип лазер, първоначалното пропускане на насищаемия поглъtitел и пропускането на изходното огледало трябва да бъдат възможно най-малки, запазвайки късата дължина. За поглъtitели с дължина между 1 и 2 mm най-ниското достъпно пропускане е  $\sim T_0 = 30\%$ . С цел повишаване на това пропускане беше проектиран микролазер, в който насищаемият поглъtitел е поставен под лек ъгъл, спрямо оста на резонатора. Това води до малко по-дълъг път, който светлината изминава през абсорбера и от там малко по-ниско пропускане, при фиксиран коефициент на поглъщане в материала – Фигура 8. Активният елемент в този случай е Nd:YAG ( $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ , 1.0 % at.), като на едно от челата му са нанесени покритията за напмпващото огледало (HR@ 1064 nm, HT@ 808 nm). Насищаемият поглъtitел е Cr:YAG ( $3 \times 3 \times 1.5 \text{ mm}^3$ ,  $T_0 = 30\%$ ), а изходното огледало е с отражение  $R = 30\%$ . Дължината на резонатора е 5.5 mm.



**Фигура 8** Микролазер в схема за генериране на импулси по-къси от 400 ps

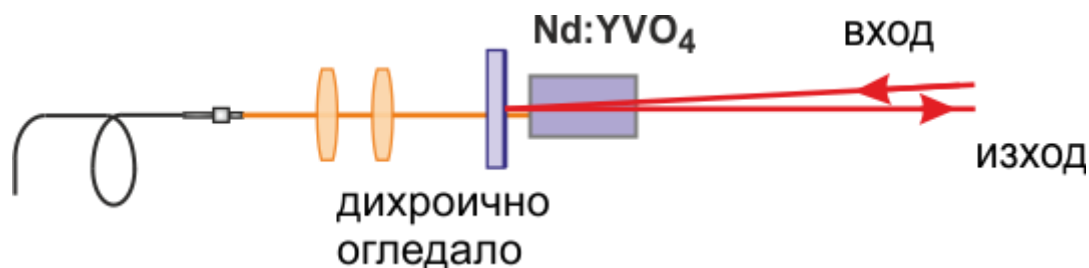
Надлъжното напмпване в този случай е реализирано, използвайки квази-непрекъснат лазерен диод, куплиран във влакно с диаметър на сърцевината 105  $\mu\text{m}$  (IPG Photonics). Дължина на вълната е 808 nm, с 200  $\mu\text{s}$  продължителност на напмпващите импулси, работещ на 500 Hz честота на повторение. При 2.6 mJ напмпваща енергия получената изходна енергия е 50  $\mu\text{J}$ , с продължителност на импулса от 286 ps.

**Проектиране на усилватели на слаби сигнали - предусилватели.**

За да се получи ефективно извличане на енергия, запасена в последващите мощни усилватели е необходимо енергията на реализираните осцилатори да се

повиши от няколко стотин микроджаула до 1-2 милиджаула. Това доведе до необходимостта да се проектира усилвател с голямо усилване за слаби сигнали или предусилвател. Две различни схеми бяха успешно реализирани.

Първата е базирана на доброто припокриване между спектрите на генерация на Nd:YAG и Nd:YVO<sub>4</sub>, както и на ниската плътност на енергията на насищане на Nd:YVO<sub>4</sub> (~0.12 J/cm<sup>2</sup>). Схема на този предусилвател е показана на Фигура 9.



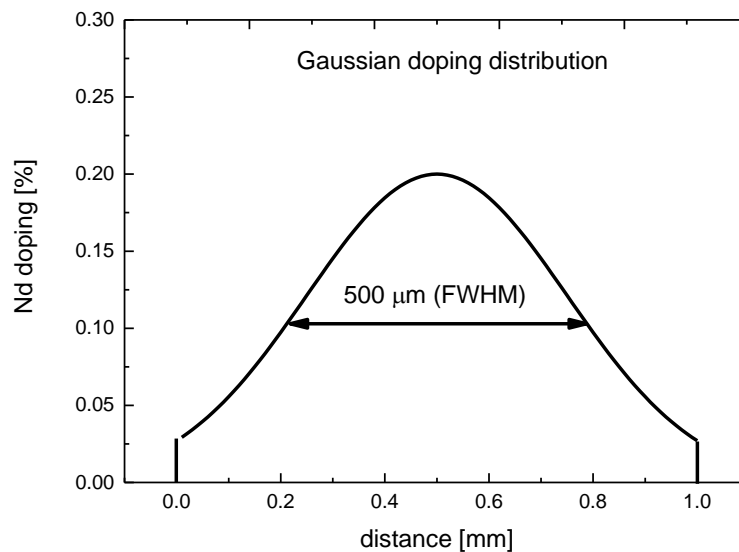
**Фигура 9** Схема на двупроходен Nd:YVO<sub>4</sub> предусилвател.

Активният елемент е Nd:YVO<sub>4</sub> с апертура 3x3 mm<sup>2</sup>, 9 mm дължина концентрация 0.2 % at. Той е надлъжно наpomпван с квази-непрекъснат лазерен диод (Jenoptik Laser GmbH, JOLD70-QPXF-1L – NA=0.22, 600 μm), излъчващ максимално 70 W пикова мощност, на 808 nm дължина на вълната, 500 Hz честота на повторение. Продължителността на наpomпващите импулси е близка до времето на живот на Nd:YVO<sub>4</sub> – 100 μs. Двупроходно усилване е реализирано с помощта на дихроично огледало (HR@ 1064 nm, HT@ 808 nm), поставено под малък ъгъл с цел разминаване на входния и изходния лъч. Лъчението, идващо от микрочипов лазер (описан по-горе), генериращ импулси с 524 ps продължителност, 180 μJ енергия, на 1064 nm дължина на вълната и 500 Hz честота на повторение, беше усилено до 800 μJ енергия в импулс, при наpomпване от 6.1 mJ.

Вторият предусилвател беше базиран на набиращите популярност в последните години, Nd:YAG кристални влакна [19, 20]. Това на практика са дълги и тънки кристали, с ниска концентрация на активните частици, в които наpomпването се разпространява вълноводно, което води до много по-добро отвеждане на топлината от активната среда. Този тип геометрия комбинира високото усилване, типично за влакнестите лазери с високия праг на разрушение типичен за кристалите.

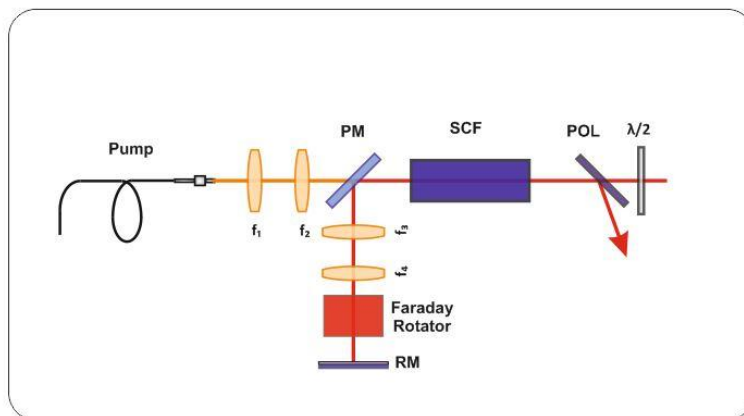
Активният елемент, използван за този експеримент е Nd:YAG кристално влакно (Shasta Crystal) с външен диаметър 1.0 mm и диаметър на дотираната

сърцевина  $\sim 0.5$  mm (FWHM), с 0.2 % at. максимална концентрация на  $\text{Nd}^{3+}$  йони в центъра на пръчката – Фигура 10.



**Фигура 10** Симулация на концентрацията на  $\text{Nd}^{3+}$  йони в  $\text{Nd}:\text{YAG}$  кристалното влакно (at% като функция на позицията).

Схемата на реализирания предусилвател с  $\text{Nd}:\text{YAG}$  кристално влакно е показана на Фигура 11. Надлъжното напмпване беше реализирано, използвайки същия квази-непрекъснат лазерен диод, като в предния експеримент, като в този случай напмпващите импулси са с продължителност 200  $\mu\text{s}$ . Диаметърът на шийката на напмпването и диаметърът на входния сигнал са подбрани, така че да съвпадат с диаметъра на сърцевината на активната среда – 500  $\mu\text{m}$ . Двухроодното усилване е реализирано посредством Фарадеев ротатор 4-f конфигурацията от леци. Входният в усилвателя сигнал идва от микрочипов лазер, генериращ лазерни импулси с енергия от 200  $\mu\text{J}$ , на честота на повторение 0.5 kHz и продължителност 800 ps. При 7 mJ погълнатата напмпваща мощност, след два прохода през усилвателя енергията в импулс достигна 0.9 mJ.



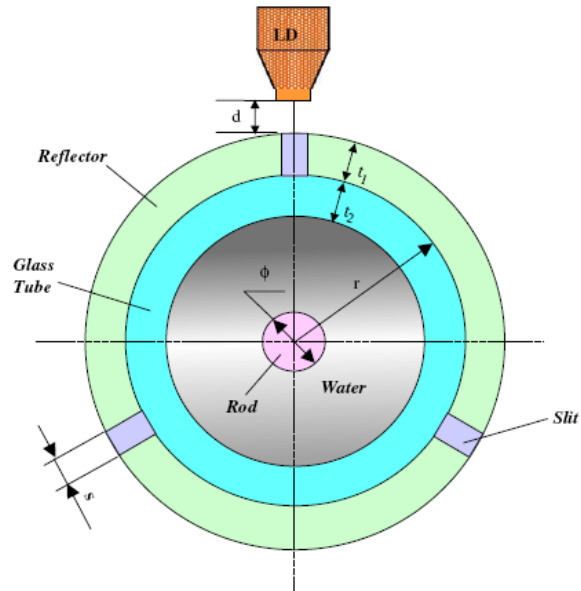
**Фигура 11** Схема на двупроходен предусилвател с Nd:YAG кристално влакно.

### Разработване на детайлна методика за конструиране на мощни лазерни усилватели с напречно диодно възбуждане.

При проектирането и конструирането на мощни лазерни усилватели с напречно-диодно възбуждане е необходимо да се следват няколко различни процедури. Първата стъпка е установяване на началните параметри на желания усилвател – при зададени параметри на входния сигнал (енергия, продължителност на импулса и други) и зададени желани изходни параметри, какви са оптималните характеристики на усилвателя. За целта беше използван специално създаден софтуер (не влизащ в темата на тази дисертация), който отчита оптично усилване в четиринивна среда, следвайки теорията на Франц и Нодвиг [21], както и модел за усилване на спонтанната емисия [22]. С негова помощ бяха определени началните параметри на усилвателите – необходима напompваща мощност, диаметър на активната среда и диаметър на входния сигнал, като основното ограничение е наложено от прага на разрушение на диелектричните покрития, в случая  $1 \text{ J/cm}^2$ .

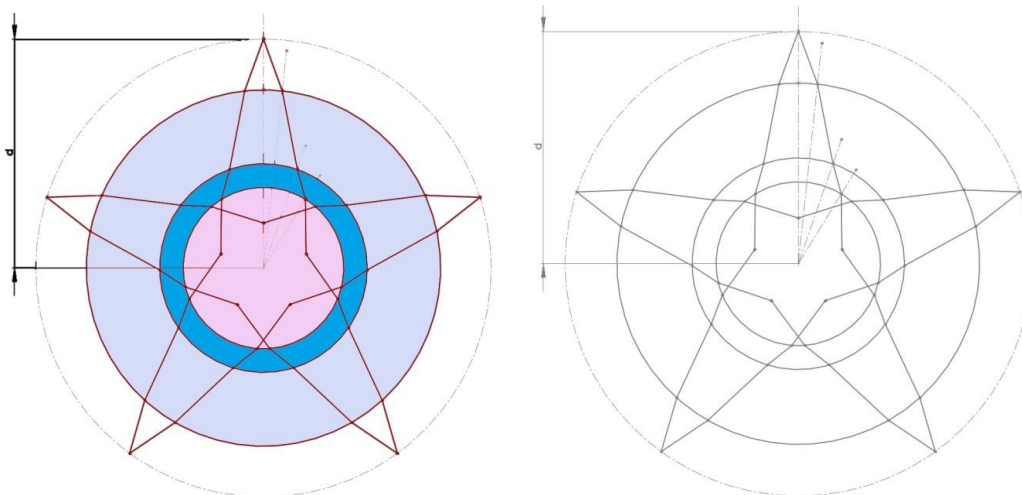
Следващата стъпка е проектиране и конструиране на напречно-диодно възбужданите усилвателни модули. Като в този случай съществуват няколко различни фактора, които трябва да се вземат под внимание, като например диаметър на активната среда, добра ефективност, хомогенност на напompването, надеждност и стабилност на конструкцията. Първите два са зададени от предишния анализ. Последните два се постигат с много прецизно проектиране, конструиране и изработка на механичната конструкция, изграждаща модула. Трябва да бъде споменато, че в предишния анализ се предполага, че разпределението на погълнатата напompваща мощност е хомогенно. Ако не бъдат взети специални мерки обаче това не е изпълнено и то стандартно е параболично. Това води до силна сферична аберация, което е и основния източник на загуби в този тип усилватели [23]. Това

обаче не е лесна задача и за да бъде тя постигната няколко различни параметъра трябва да бъдат симулирани и установени преди да се премине към производство на механичните конструкции [24].

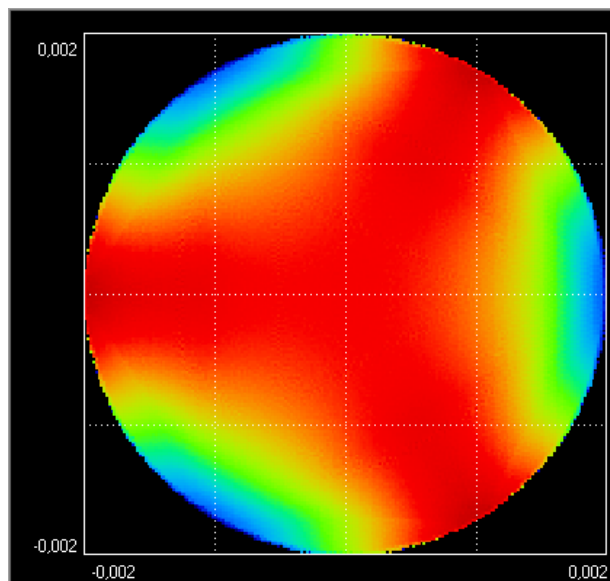


**Фигура 12** Схема на напречно-диодно възбуден модул и параметрите определящи неговия дизайн.

От показаните на Фигура 12 параметри, най-важните, които могат да се варират са два – отстоянието на лазерните диоди от центъра на активната среда и концентрацията на активните частици. Като за целта бяха използвани два различни софтуера – SolidWorks (Фигура 13) за визуализация на лъчите и Diode Pumping (Фигура 14) за симулиране на поглъщането.

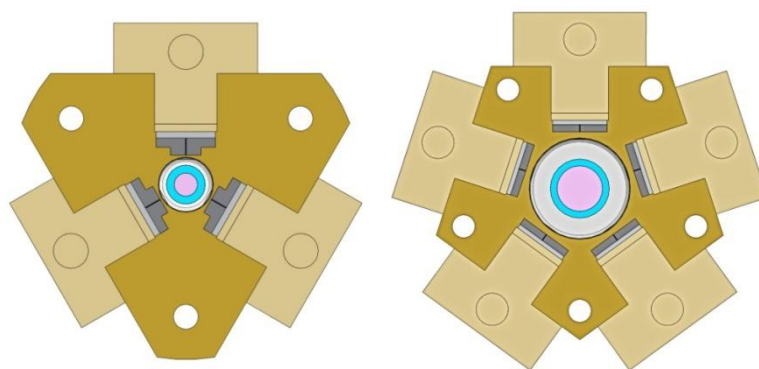


**Фигура 13** Визуализация на лъчите чрез SolidWorks.



**Фигура 14** Симулация на разпределението на погълнатата напompваща мощност с Diode Pumping.

Следващата стъпка е създаването на триизмерни модели, както и производствени чертежи, с помощта на 3D CAD/CAM средата (3 dimensional computer-aided design and computer-aided manufacturing) SolidWorks™. Като създаденият дизайн (Фигура 15) позволява много лесно скалиране към по-високи енергии. Например модули с три-кратна симетрия могат да бъдат използвани за среди с диаметри до 4 mm (до 40 mJ), пет-кратна симетрия за среди до 7 mm диаметър (до 160 mJ), до 12 mm (до 500 mJ) – седем-кратна и т.н.



**Фигура 15** Принципен дизайн на напречно-диодно възбудени модули с три-кратна геометрия (ляво) и пет-кратна (дясно).

Последната стъпка е измерването на параметрите на конструираните модули. Разпределението на погълнатата напompваща мощност се измерва с помощта на CCD камера – Ophir SP620 и безаберационна система за изображение – обектив Pentacon Auto 1.8/50 MC. Използвайки анализа на Финдли и Клей [25], всеки модул е поставен в къс плоско-паралелен резонатор и с помощта на различни изходни огледала се измерва малосигналното усилване. Накрая използвайки колимиран

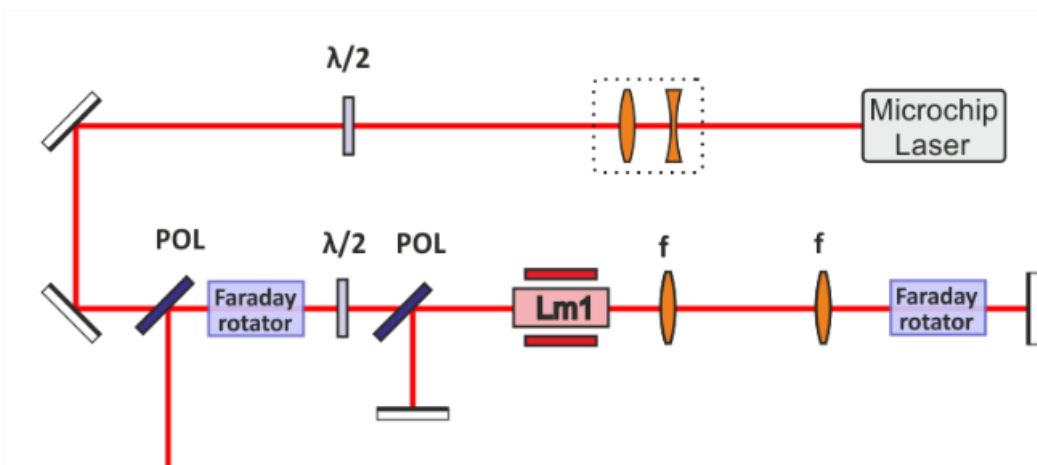
сноп от He-Ne лазер, преминаващ през усилвателния модул се измерва силата на термично индуцирана леща.

### **Четирипроходен усилвател, базиран на Nd:YAG лазерен модул с напречно диодно възбуждане.**

Първият мощен усилвател, реализиран с проектираните лазерни усилвателни модули, е базиран на четирипроходна схема – Фигура 16. Целта на тази многопроходна схема беше да елиминира нуждата от допълнително устройство (предусилвател). Лъчението от осцилатора се вкарва директно в мощния усилвател. Макар че плътността на енергията е доста по-ниска от плътността на енергията на насищане на средата, на входа на усилвателя, след първите два прохода, тя вече е съизмерима и в последващите два прохода през усилвателя се получава доста ефективна екстракция на запасената енергия.

Осцилаторът, използван за този експеримент генерира поляризирано изходно лъчение с максимална енергия от 300  $\mu\text{J}$ , на честота 0.5 kHz с продължителност на импулсите 800 ps. Неговото лъчение е колимирано в размер 2 mm (диаметър на ниво  $1/e^2$ ), използвайки обектив от две лещи. Четирипроходната схема е реализирана посредством два Фарадееви ротатора и 4-f конфигурацията от лещи. Усилвателният модул е напречно-диодно напмпван в трикратна симетрия, от 18 (3x6) квази-непрекъснати лазерни диодни бара, всеки излъчващ до 80 W пикова мощност, на дължина на вълната 808 nm. Активният елемент е Nd:YAG, 3 mm диаметър, 65 mm дължина и 0.6 at. % концентрация. Продължителността на напмпващите импулси са с продължителност 240  $\mu\text{s}$ , а за синхронизация на входния сигнал с напмпващия оптичен импулс се използва външно синхронизиращо устройство.

При максимален вход от 300  $\mu\text{J}$ , на изхода на усилвателя при максимално напмпване се получават 18 mJ.



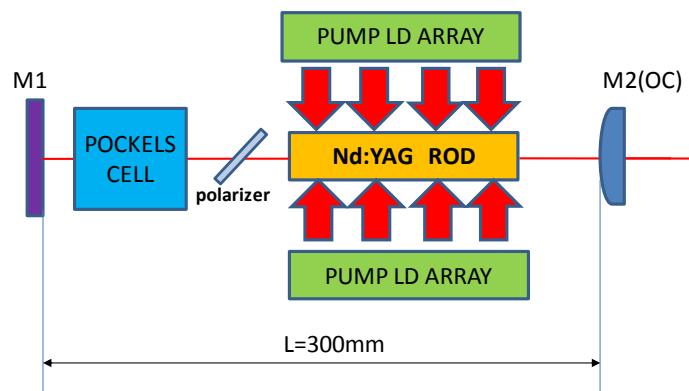
Фигура 16 Схема четирипроходния усилвател.

### Използване на проектираните усилвателни модули.

Друг експеримент, проектиран в хода на дисертацията, отново целящ да се опрости лазерната система е генерация на къси лазерни импулси ( $<15$  ns), с много висока енергия ( $>10$  mJ), директно от осцилатора. За целта един от проектираните напречно-диодно напompвани модули беше използван в режим на нестабилен резонатор, използвайки изходно огледало с профилирано отражение. Макар много изследвания да са правени за подобни лампово напompвани системи, за диодно напompвани такива липсват. Като тук основното предизвикателство е да се използва кривината на огледалото с профилирано отражение, така че да се компенсират силната термично индуцирана леща.

Принципната схема на лазерния осцилатор е показана на Фигура 17. Тя се състои от напречно-диодно напompван Nd:YAG модул, в комбинация с ВВО клетка на Покелс и тънък Брюстеров поляризатор, за получаване на Q-модулация. Диаметърът на пръчката е 3 mm, с дължина 65 mm и 0.6 % ат. концентрация. Модулът е с трикратна симетрия и е напompван от 18 (3x6) квази-непрекъснати лазерни диода, до максимална пикова мощност от 75 W, което отговаря на 1350 W (252 mJ @ 200  $\mu$ s напompващ импулс). Нестабилният лазерен резонатор се състои от плоско глухо огледало (HR @ 1064 nm) и Гаусово изходно огледало с профилирано отражение (радиус на кривината 3 m, пиково отражение 30%,  $1/e^2$  радиус 1 mm. Дължината на резонатора е 300 mm.





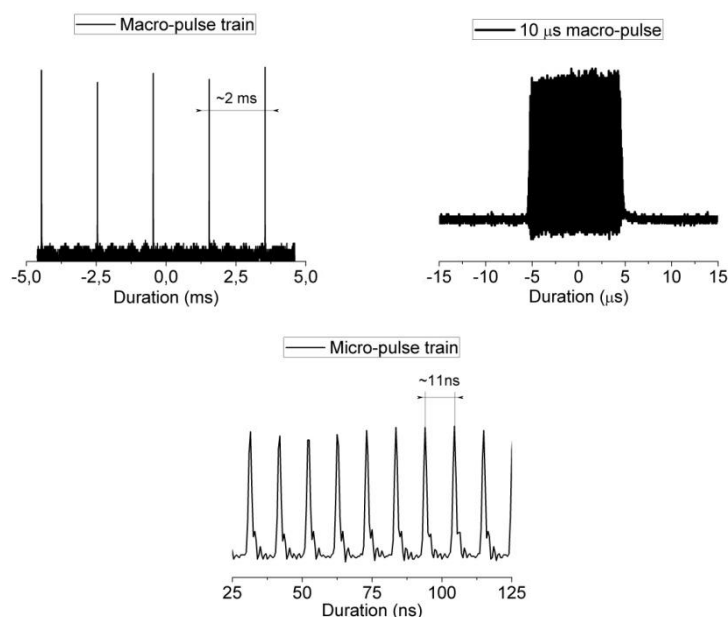
**Фигура 17** Принципна схема на нестабилен резонатор, работещ в режим на активна Q-модулация.

Работейки на честота на повторение на импулсите 1 kHz беше получена максимална изходна енергия от 10 mJ, на 1064 nm дължина на вълната, с продължителност на импулса – 14.9 ns.

#### **Усилвател серия от импулси.**

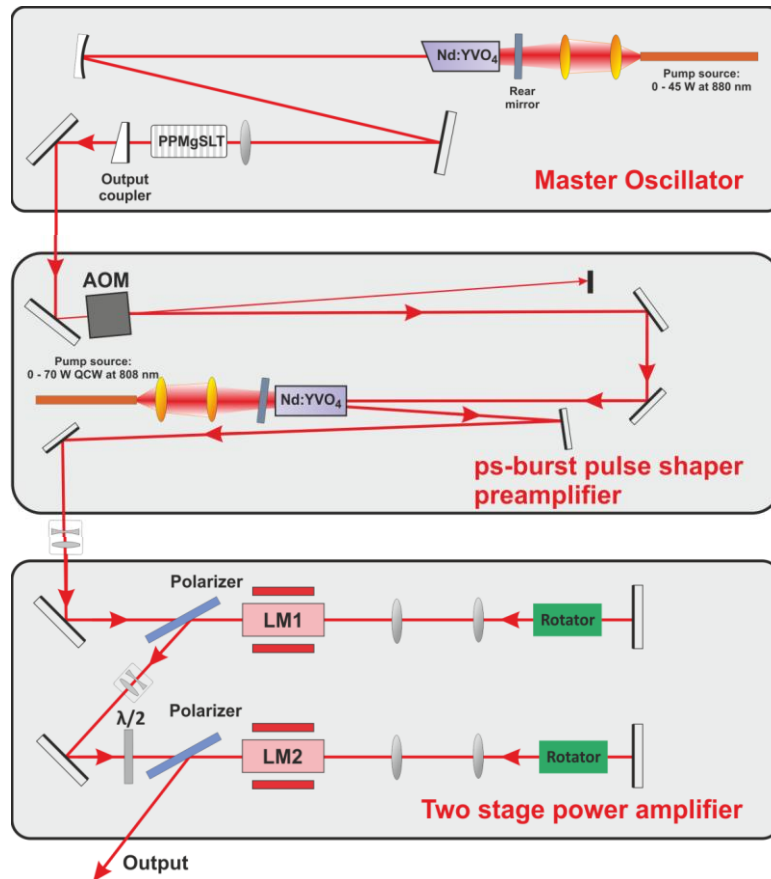
Друг тип лазерна система, създадена за целите на тази дисертация, включва използването на създадените напречно-диодно възбудани модули за усилване на серия, или пакети, от стотици пикосекундни лазерни импулси, вместо единичен наносекунден импулс. Такива системи, генериращи пакети с висока енергия, са необходими за редица ключови приложения като синхронно напомнимани оптични параметрични осцилатори [26], фотокатодни инжектори [27] и други. Освен това такива пакети от пикосекундни импулси имат редица преимущества пред единични наносекундни и пикосекундни импулси за прецизна обработка и аблация на материали.

В текущия експеримент е реализирано усилването на пакети (макро-импулси) от 6 ps импулси (микро-импулси) – Фигура 18. Серията от макро-импулси е с пренастройваема продължителност (10  $\mu\text{s}$  - 100  $\mu\text{s}$ ) и се повтаря с честота 500 Hz, отделена от непрекъснатата серия от импулси идваща от Nd:YVO<sub>4</sub> задаващ осцилатор, работещ в режим на пасивна синхронизация на модовете с честота на повторение 95 MHz.



**Фигура 18** Структура на импулсите на (а) серията от макро-импулси, (б) формата на макро-импулсът и (в) серията от микро-импулси в единичен макро-импулс.

Експерименталната постановка е показана на Фигура 19. Сигналът от задаващия осцилатор минава през надлъжно-диодно наpomпван, двупроходен предусилвател – 9-mm дълъг Nd:YVO<sub>4</sub> с 0.3 at. % концентрация. Той е наpomпван от квази-непрекъснат лазерен диод, даващ максимално 70 W пикова мощност при честота на повторение 500 Hz. Последващото усилване се осъществява в мощни усилвателни стъпала, всяко от които използва двупроходна схема и напречно-диодно наpomпвани Nd:YAG модули. Първото усилвателно стъпало се състои от Nd:YAG кристал (3 mm диаметър, 55 mm дължина, 1.0 at. % концентрация), наpomпван в три-кратна симетрия от 15 (3x5) квази-непрекъснати, лазерни диодни бара, всеки от които излъчва максимално 100 W пикова мощност на 808 nm дължина на вълната. Във второто усилвателно стъпало активният елемент отново е Nd:YAG кристал (4 mm диаметър, 65 mm дължина, 0.6 at. % концентрация), наpomпван в пет-кратна симетрия от 30 (5x6) квази-непрекъснати, лазерни диодни бара, всеки от които излъчва максимално 100 W пикова мощност на 808 nm дължина на вълната. И в двете стъпала двупроходното усилване е реализирано посредством Фарадеев ротатор 4-f конфигурацията от лещи.



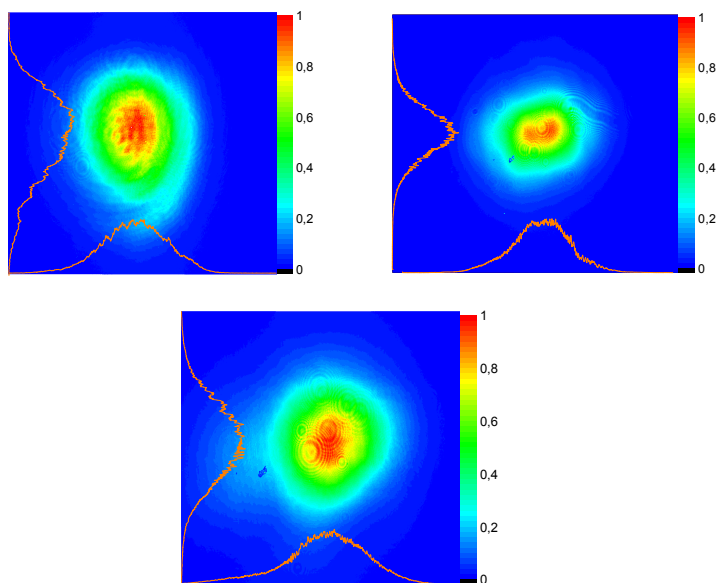
Фигура 19 Схема усилвателя на серия от импулси.

Предусилвателят е наpomпван с импулси с продължителност, варираща между 24 μs – 120 μs (в зависимост от продължителността на макро-импулса), с енергии съответно от 1.5 mJ – 7.7 mJ. След двупроходно усилване, енергията на 10 μs макро-импулси достигна 0.17 mJ, стартирайки от 0.026 mJ и 1.9 mJ за 100 μs макро-импулс, стартирайки от 0.26 mJ. След двете мощни усилвателни стъпала енергията в макро-импулсите достигна 15.1 mJ, за 10 μs пакет и 43.1-mJ, за 100 μs пакет, което отговаря на пикови мощности от 1.51 kW и 0.43 kW, и 7.6 W и 21.5 W средни мощности, съответно. Резюме на резултатите е показано в Таблица 1.

	$\tau_{train}=10\mu s$	$\tau_{train}=20\mu s$	$\tau_{train}=30\mu s$	$\tau_{train}=40\mu s$	$\tau_{train}=60\mu s$	$\tau_{train}=80\mu s$	$\tau_{train}=100\mu s$
$E_{oscillator}$ [mJ]	0.026	0.050	0.080	0.104	0.158	0.208	0.258
$E_{pre-amplifier}$ [mJ]	0.168	0.332	0.508	0.698	1.09	1.504	1.926
$E_{1st\ stage}$ [mJ]	3.6	6	8.0	9.5	11.7	13.5	14.9
$E_{2nd\ stage}$ [mJ]	15.1	21.9	27.1	30.8	36.5	40.4	43.1
$P_{peak\ 2nd\ stage}$ [W]	1510	1094	904	769	608	506	431

Таблица 1 Изходна енергия за различните усилвателни стъпала, при различна продължителност на макро-импулса.

Качеството и профилът на изходното лъчение са измерени, използвайки комерсиален CCD анализатор, както след осцилатора ( $M^2 < 1.3$ ), така и след първото и второто мощно усилвателно стъпало ( $M^2 < 1.9$ ) – Фигура 20.



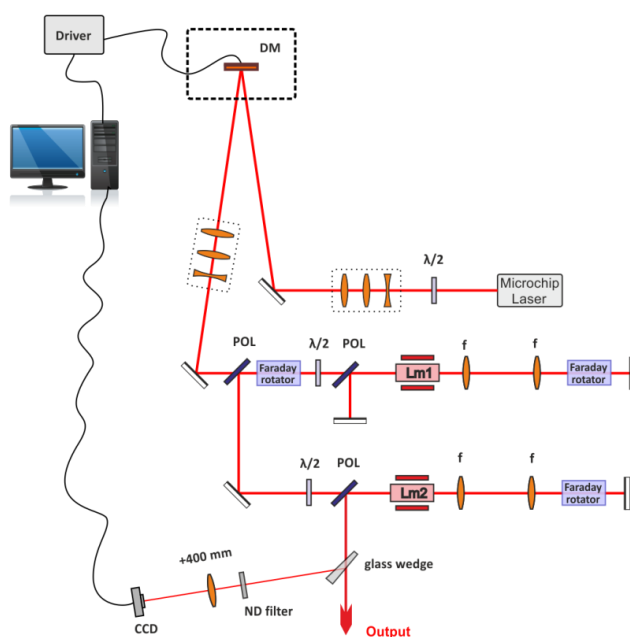
**Фигура 20** Профили на изходното лъчение, след (а) осцилатора, (б) първия мощен усилвател и (в) на изхода на цялата система.

#### **Техники за подобряване на качеството на лъчението в Nd:YAG мощни усилватели.**

Термично индуцираните изкривявания в активния елемент са голям проблем в лазерните системи, работещи при висока средна мощност и представляват основното ограничение за постигане на по-високи изходни мощности [28]. Освен ограничаване на изходната мощност те водят и до влошаване на качеството на лъчението и напречния профил. Това са много важни характеристики за различни приложения на мощни лазерни системи, като например интерферометрия на гравитационни вълни [29], лазерно индуциран термоядрен синтез [30] и други. Макар че при дизайна на напречно-диодно напompваните усилвателни модули, както и на самите лазерни усилватели, бяха взети специални мерки за намаляване на термично индуцираното двулъчепречупване и силата на термичната леща, с увеличаване на напompването тези ефекти се засилват и започват да влияят все по-силно. Ето защо преди увеличаване на средната изходна мощност от усилвателя до 100-200 W (100-200 mJ енергия) е необходимо да се изследват допълнителни техники за компенсация на тези ефекти.

За тази цел беше използвано пиезоелектрично деформируемо огледало (ПДО), с контролирана обратна връзка и различни генетични алгоритми. Схема на експерименталната постановка е показана на Фигура 21. В случая ПДО е поставено на входа на серията от усилвателни стъпала. За задаващ осцилатор се използва Nd:YAG/Cr:YAG микрочипов лазер, генериращ лазерни импулси с продължителност 1 ns, енергия 200  $\mu$ J, при честота на повторение 0.75 kHz. За формиране на размера

на снопа на лазера в различните стъпала бяха използвани 2 три-лещови обектива. Като диаметъра на снопа върху ПДО, в първото усилвателно стъпало и във второто, са съответно 10 mm, 2 mm и 3.5 mm съответно. Първото стъпало се състои от усилвателен модул с три-кратна симетрия, напомпван до максимално 400 mJ енергия, на 808 nm (3 mm диаметър на активната среда), а второто – пет-кратна симетрия с максимално 360 mJ, на 808 nm (5 mm диаметър на пръчката). В първото стъпало се използва четирипроходна схема на усилване, реализирана посредством два Фарадееви ротатора и 4-f конфигурацията от лещи, а във второто – двупроходна, посредством Фарадеев ротатор и отново 4-f конфигурацията от лещи. На изхода на лазерната система е поставена стъклена пластинка. Слабото отражение от нея се фокусира върху CCD камера, посредством леща с фокусно разстояние 400 mm. Сигналът от камерата се използва в алгоритъма за оптимизиране на кривината на огледалото.

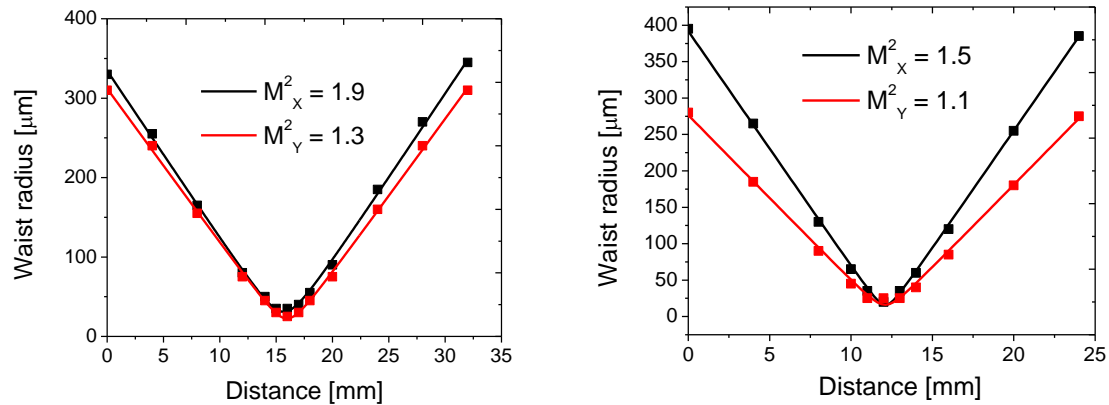


**Фигура 21** Експериментална постановка на лазерен усилвател, използващ ПДО.

С входна енергия от 200  $\mu\text{J}$  на изхода на системата бяха получени 38 mJ. Качеството на изходното лъчение беше измерено преди и след включване на оптимизационния софтуер на огледалото – Фигура 22. Като преди оптимизацията на изхода на системата  $M^2$  фактора е 1.9 по едната и 1.3 по другата ос, а след - се подобрява до 1.5 по едната и 1.1. по другата ос.

Оптимизацията на кривината на ПДО се прави с помощта на BeamTuner оптимизационен софтуер, като системата работи при максимална енергия. Различни

метрики за подобряване на  $M^2$  фактора бяха използвани, като най-добри резултати бяха постигнати с “spot width” (минимизиране на размера на петното върху CCD камерата).



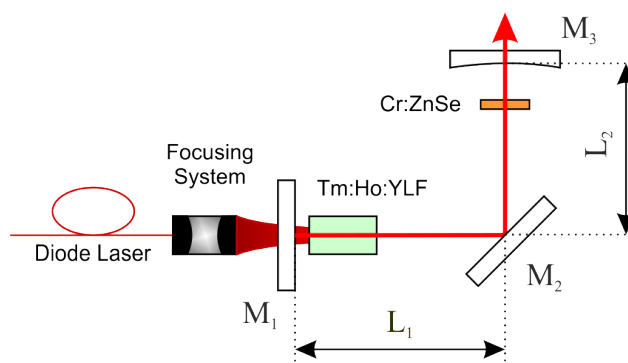
Фигура 22  $M^2$  фактор на системата преди и след оптимизация.

### Диодно-напомпвани лазерни осцилатори генериращи около 2 μm.

Базирайки се на техниките и методиките за генерация на лазерни импулси с висока енергия, висока пикова и средна мощност, използвани в тази дисертация за лазерите генериращи около 1 μm, бяха изследвани и конструирани подобни лазери, генериращи в диапазона около 2 μm. Като първо се започна със среди базирани на  $Tm^{3+}$  йон, типично излъчващи около 1.9 μm и след се премина на  $Tm^{3+}, Ho^{3+}$  кодотирани твърдотелни лазерни среди, типично излъчващи около 2.1 μm. Този тип материали бяха предпочетени пред единично дотирани  $Ho^{3+}$  материали, поради достъпността на напомпващи лазерни диодни източници. Различни лазери, базирани и на двата типа активни йони, дотирани в различни матрици, бяха конструирани и детайлно изследвани както в непрекъснат режим на работа, така и в режим на пасивна Q-модуляция. Като за реализация на втория бяха използвани добре разпространените за този спектрален диапазон материали  $Cr^{2+}:ZnS$  и  $Cr^{2+}:ZnSe$ .

Експерименталната постановка, използвана и за двата типа лазерни среди е показана на Фигура 23. Сгънат полу-сферичен резонатор беше използван както в непрекъснат, така и в режим на Q-модуляция. Предимството на този тип резонатор е, че непогълнатото напомпващо лъчение не достига насищаемия погълтател, което води до нестабилности в обикновените резонатори с две огледала. Напомпващото лъчение преминава през плоско огледало с AR покритие за напомпващата дължина на вълната и HR за лазерната (1800-2090 nm). Сгъващото огледало е плоско с високо

пропускане около 800 nm и високо отражение за лазерната дължина на вълната, под 45°. Изходни огледа с различни отражения и кривини от -75 mm или -100 mm бяха използвани. Напомпващият източник беше непрекъснат AlGaAs лазерен диод, генериращ на 793 nm, куплиран в оптично влакно с диаметър 105  $\mu\text{m}$  (NA=0.15), излъчващ максимално 11.6 W. Диаметърът на шийката на напомпването в активната среда е 210  $\mu\text{m}$ , близко до диаметъра на TEM<sub>00</sub> Гаусовия мод. Поредицата от изходни импулси в режим на Q-модулация беше наблюдавана с помощта на бърз InGaAs фотодиод (>12.5 GHz at 2  $\mu\text{m}$ ) и 1 GHz дигитален осцилоскоп.



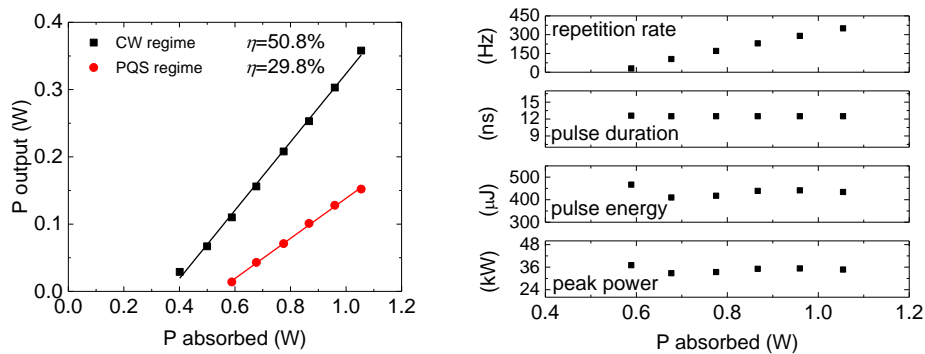
**Фигура 23** Експериментална постановка използвана за конструираните лазери на 2  $\mu\text{m}$ .

Първата стъпка беше запознаване с добре установените среди Tm:LiYF<sub>4</sub> (Tm:YLF) [31] и Tm:LiLuF<sub>4</sub> (Tm:LLF) [32], с които са постигнати едни от най-добрите резултати до момента в този режим на работа, като те бяха и малко подобрени. Три различни мостри бяха достъпни – 8% at. дотиран Tm:YLF, a-cut (3.1(c)x3.38(cut)x2.96 mm<sup>3</sup>), 8% at. дотиран Tm:LLF, a-cut (3.17(c)x2.63(cut)x3.22 mm<sup>3</sup>), и 12% at. дотиран Tm:LLF, a-cut (3.15(c)x3.54(cut)x2.75 mm<sup>3</sup>). Всички бяха монтирани в меден държач, активно охлаждаем с вода при фиксирана температура от 18 °C. Пасивна Q-модулация беше постигната в множество комбинации от изходни огледала с различно пропускане и насищаеми поглътителители с различно първоначално пропускане (Cr:ZnS и Cr:ZnSe). Като най-добрите резултати бяха постигнати с 12% at. Tm:LLF – най-висока енергия в импулс беше постигната в комбинация с T = 32% + Cr:ZnS 66% – 1.56 mJ, а най-късите импулси постигнати – 5.6 ns, в комбинация с T = 32% + Cr:ZnSe 65%.

Следваща стъпка беше изследването на относително новата лазерна Tm:LiGdF<sub>4</sub> (Tm:GLF), подобна на добре познатите YLF и LLF, в която Tm<sup>3+</sup> йон заменя Gd<sup>3+</sup> в кристалната решетка, вместо Y<sup>3+</sup> или Lu<sup>3+</sup>. Макар че, генерация в непрекъснат режим [33], както и в режим на синхронизация на модовете [34] е демонстрирана преди, в режим на Q-модулация не е постигнат до момента.

Стойностите на сечението за стимулирана емисия ( $3.1 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  на  $1877 \text{ nm}$ , за  $p$  поляризацията) и флуоресцентно време на живот на горното лазерно състояние ( $16.0 \text{ ns}$ ) [35], са съизмерими с тези на другите флуориди. Това прави  $\text{Tm}:\text{GLF}$  атрактивен нов материал за генерация на къси лазерни импулси с висока пикова мощност в диапазона около  $1.9 \text{ }\mu\text{m}$ .

Най-добрите резултати, постигнати с тази среда бяха в комбинация с  $\text{Cr}:\text{ZnSe}$  насищаем погълтател с  $82\%$  първоначално пропускане и изходно огледало с пропускане  $20\%$ . Максималната достигната средна мощност беше  $152 \text{ mW}$ , при погълнатата мощност от  $1.0 \text{ W}$ . Продължителността на импулса беше  $13 \text{ ns}$ , при честота на повторение увеличаваща се от  $30 \text{ Hz}$  до  $350 \text{ Hz}$ , с увеличаване на напompването. Максималната постигната енергия в импулс беше  $441 \text{ }\mu\text{J}$ , отговарящо на пикова мощност от  $35 \text{ kW}$ , при средна мощност  $128 \text{ mW}$  на честота на повторение  $290 \text{ Hz}$ , при погълнатата напompваща мощност от  $0.96 \text{ W}$ . Кратко резюме на постигнати резултати е показано на Фигура 24.



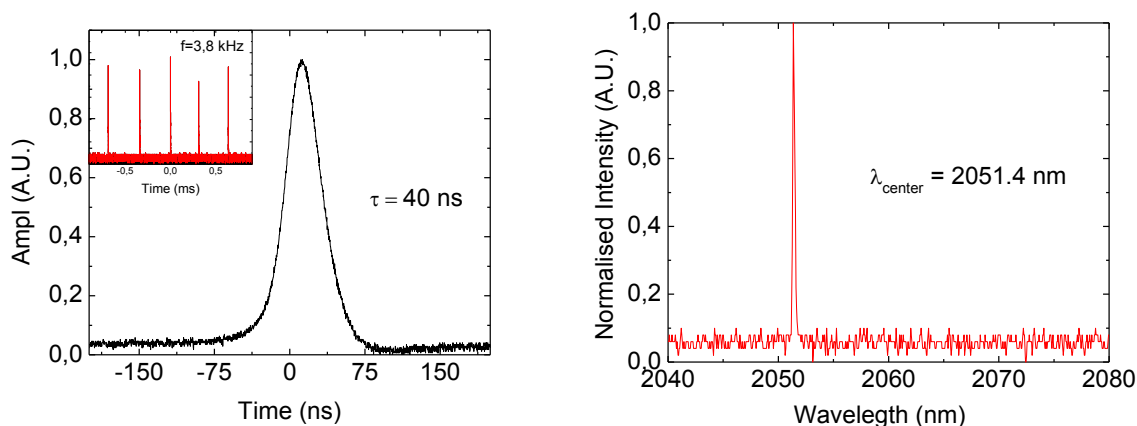
**Фигура 24** Изходна мощност в непрекъснат режим и в режим на пасивна Q-модуляция, като функция на погълнатата мощност. (а), и характеристики на изходния импулс при различна погълнатата мощност (б).

Анализ, подобен на този направен на диодно напompвани лазери, работещи в режим на пасивна модуляция на доброкачествеността, базирана на  $\text{Tm}$ -дотирани среди, беше направен и за  $\text{Tm},\text{Ho}$ -кодотирани среди. Той показва, че на практика не съществуват такива лазери генериращи импулси, по-къси от  $\sim 350 \text{ ns}$  ( $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{GdVO}_4$  [36]), което е доста незадоволителна ситуация, особено имайки предвид, че в режим на активна Q-модуляция с единично дотирани  $\text{Ho}$  среди са постигнати няколко десетки наносекунди и то с доста високи енергии, макар и използвайки лазер-лазерно възбуждане. Това доведе до необходимостта от допълнителен анализ на типичните насищаем погълтатели, използвани за диапазона около  $2.1 \text{ }\mu\text{m}$ . Той показва, че за дължина на вълната около  $2050 \text{ nm}$ , сечението за погълтане от



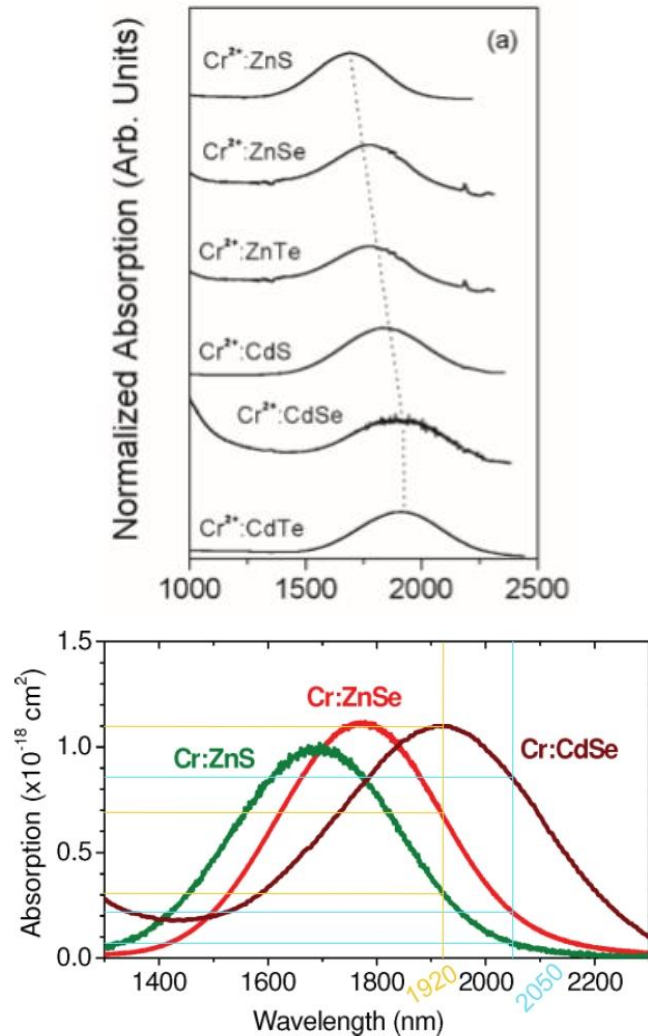
основно състояние на материала Cr:ZnSe е почти 2.5 пъти по-голямо от това на Cr:ZnS. Ето защо този погълтител е много по-подходящ за Q-модулация на Tm,Ho базирани активни среди.

Именно такъв погълтител беше подбран за експериментите с активна среда Tm,Ho:YLF, (5.2% Tm; 0.5% Ho, a-cut, с размери 3.07(c)x3.68(cut)x2.63 mm<sup>3</sup>). Първоначалното пропускане на погълтителя е  $T_0 = 92\%$  на 2050 nm дължина на вълната. Най-добрите резултати, които бяха постигнати са продължителност на импулси около 40 ns, с максимална енергия, достигаща 33  $\mu\text{J}$ , при честоти на повторение вариращи от 600-3800 Hz, с увеличаване на напмпването (максималната погълната мощност не надвишаваше 1.3 W) – Фигура 25.



**Фигура 25** а) Форма на Q-импулса и поредицата от импулси и (б) изходния спектър в режим на пасивна Q-модулация.

Макар и тези резултати да са рекордни те все още са далеч от желаните. Необходимо условие при лазерите, работещи в режим на пасивна Q-модулация е сечението за поглъщане от основно състояние да бъде много по-голямо от сечението за стимулирана емисия на активната среда. Ето защо беше необходимо да се изследват материали, различни от комерсиално разпространените Cr:ZnS и Cr:ZnSe, като потенциални насищаеми погълтители за Tm,Ho базирани среди. Направеният анализ показва, че материали като Cr:CdTe или Cr:CdSe, които имат подобни свойства на добре познатите Cr:ZnS и Cr:ZnSe, биха били много по-подходящи за насищаеми погълтители на лазери, генериращи над 2  $\mu\text{m}$  – Фигура 26.



**Фигура 26** Поглъщане на различни Cr-дотирани II-VI полупроводници, като функция на дължината на вълната.

Намиране на подходящи мостри от тези екзотични материали обаче се оказва не лесна задача. Мострите, използвани за тези експерименти (Cr:CdTe), бяха с много ниско първоначално пропускане – 30% и 45%, поради което с наличните напompващи източници не беше възможно получаването на Q-модулация с тях. Беше направен експеримент за измерване на параметрите на материала Cr:CdTe и неговото потенциално бъдещо приложение като насищаем поглъстител. С помощта на Tm:LLF лазер работещ в режим на пасивна Q-модулация, бяха измерени плътността на енергията на насищане на материала и сеченията за поглъщане от основно и възбудено състояние, за дължина на вълната 1915 nm. И наистина сечението за поглъщане от основно състояние е почти 1 порядък по-високо от това при Cr:ZnSe, за дължини на вълните около 2050 nm, което показва, че Cr:CdTe е добър потенциален кандидат за получаване на висока изходна енергия и къси

лазерни импулси от диодно напompвани Tm,Ho- базирани лазери, работещи в режим на пасивна Q-модулация.

### III. Списък на публикации и доклади на научни конференции свързани с дисертацията

#### Publications in full text in various international peer reviewed journals:

1. B. Oreshkov, A. Gianfrate, S. Veronesi, V. Petrov, U. Griebner, H. Yu, I. Buchvarov, D. Parisi and M. Tonelli, "Generation of 40 ns laser pulses by a diode-pumped passively Q-switched Tm,Ho:YLF laser", Laser Phys. Lett. 11, 115801 (5pp), (2014).  
<http://dx.doi.org/10.1088/1612-2011/11/11/115801>;
2. B. Oreshkov, S. Veronesi, M. Tonelli, A. di Lieto, V. Petrov, U. Griebner, X. Mateos, and I. Buchvarov, "Tm<sup>3+</sup>:LiGdF<sub>4</sub> Laser, Passively Q-Switched With a Cr<sup>2+</sup>:ZnSe Saturable Absorber", IEEE Photonics Journal, Vol. 7, No. 3, 1502206, June 2015  
10.1109/JPHOT.2015.2427737

#### Publications in proceedings of peer reviewed international scientific conferences:

##### OSA Technical Digest (online) and IEEE Explore digital library (1-3 Pages):

1. B. Oreshkov, V. Aleksandrov, H. Iliev, A. Trifonov, I. Buchvarov, *1.5 kW Burst of Picosecond Pulses with Scalable Energy and Average Power Generated by Diode Pumped Nd-laser System*", CLEO: 2013, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper CA\_P\_7  
<http://dx.doi.org/10.1109/CLEOE-IQEC.2013.6800677>
2. B. Oreshkov, V. Alexandrov, H. Iliev, A. Trifonov, I. Buchvarov, "High Average Power, Kilowatt Bursts of 6 ps Pulses", CLEO: 2013, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper CTh4I.6  
[http://dx.doi.org/10.1364/CLEO\\_AT.2014.JW2A.84](http://dx.doi.org/10.1364/CLEO_AT.2014.JW2A.84)
3. Bozhidar Oreshkov, Antonio Gianfrate, Stefano Veronesi, Valentin Petrov, Uwe Griebner, Haohai Yu, Ivan Buchvarov, Daniela Parisi, and Mauro Tonelli, "Passive Q-switching of a diode-pumped Tm,Ho:YLF laser using Cr:ZnSe saturable absorber", CLEO: 2014, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper SM3F.8  
[http://dx.doi.org/10.1364/CLEO\\_SI.2014.SM3F.8](http://dx.doi.org/10.1364/CLEO_SI.2014.SM3F.8)
4. B. Oreshkov, V. Aleksandrov, H. Iliev, A. Trifonov, I. Buchvarov, "High Average Power, Nd-based Laser System, Generating 1.5 kW Burst of 6-ps Laser Pulses", Frontiers in Optics, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper LTh4F.6, <http://dx.doi.org/10.1364/LS.2013.LTh4F.6>
5. B. Oreshkov, S. Veronesi, M. Tonelli, A. di Lieto, V. Petrov, U. Griebner, X. Mateos, I. Buchvarov, "Passively Q-Switched Tm<sup>3+</sup>:LiGdF<sub>4</sub> Laser Using Cr<sup>2+</sup>:ZnSe as Saturable Absorber" CLEO: 2013, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper CA4.4

##### Other scientific conferences (1-3 Pages):

1. B. Oreshkov, V. Aleksandrov, H. Iliev, A. Trifonov, I. Buchvarov, “*1.5 kW BURST OF PICOSECOND PULSES WITH SCALABLE ENERGY AND AVERAGE POWER*”. In **Second International Congress for Physics Sciences, Bulgaria, 2013**.
2. B. Oreshkov, D. Chuchumishev, A. Gaydardzhiev, I. Buchvarov, “*28-mJ, single frequency, sub-nanosecond Nd-MOPA system, at kHz repetition rate*”. In **International Student Conference on Photonics (ISCP), Romania, 2012**.
3. B. Oreshkov, K. Popov, S. Gagarsky, N. Belashenkov, I. Buchvarov, “*1 kHz, 10 mJ Q-switched diode pumped Nd:YAG Laser with a Variable Reflectivity Mirror*”. In **Laser Optics Conference, Russia, 2016**.
4. B. Oreshkov, D. Chuchumishev, I. Buchvarov, S. Gagarsky, V. Bezzubik, N. Belashenkov, “*Beam Quality Improvement in kHz Solid State Laser Amplifier Through Utilization of a Piezoelectric Deformable Mirror*”. In **Laser Optics Conference, Russia, 2016**.

## IV. Литература

- [1] T. N. Maiman, „Stimulated Optical Radiation in Ruby,“ *Nature*, том 187, pp. 493-, 1960.
- [2] M. Ostermeyer, P. Kappe, R. Menzel и V. Wulfmeyer, „Diode-pumped Nd : YAG master oscillator power amplifier with high pulse energy, excellent beam quality, and frequency-stabilized master oscillator as a basis for a next-generation lidar system,“ *Appl. Opt.*, том 44, pp. 582-, 2005.
- [3] D. Chuchumishev, E. Nagel, A. Nierlich, S. Philipov, T. Genadiev, T. Fiebig, I. Buchvarov и С. P. Richter, „Mid-IR Laser Tissue Ablation with Little Collateral Damage Using a Laser Tunable in the Water Absorption Peak,“ в *Conference on Lasers and Electro-Optics, paper SM4P.7*, San Jose, USA, 2014.
- [4] W. O'Neill и K. Li, „High-Quality Micromachining of Silicon at 1064 nm Using a High-Brightness MOPA-Based 20-W Yb Fiber Laser,“ *IEEE J. Sel. Top. in Quant. Electr.*, том 15, pp. 462-, 2009.
- [5] N. Pavel, M. Tsunekane и T. Taira, „Composite, all-ceramics, high-peak power Nd:YAG/Cr4+:YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition,“ *Optics Express*, том 19, № 10, pp. 9378-9384, 2011.
- [6] O. A. Hurricane, D. A. Callahan, D. T. Casey, P. M. Celliers, C. Cerjan, E. L. Dewald, T. R. Dittrich, T. Doppner, D. E. Hinkel, B. A. Remington, J. D. Salmonson, P. T. Springer и R. Tommasini, „Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion,“ *Nature*, том 506, pp. 343-348, 2014.
- [7] J. Abadie, B. P. Abbott, R. Abbott и e. al., „Predictions for the Rates of Compact Binary Coalescences Observable by Ground-based Gravitational-wave Detectors,“ *Classical and Quantum Gravity*, том 27, № 17, p. 173001, 2010.
- [8] J. J. Zayhowski, „Microchip lasers,“ *Optical Materials*, том 11, pp. 255-267, 1999.
- [9] C. A. Brau и M. H. Mendenhall, „The Vanderbilt University Free-Electron Laser Center,“ *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, том 331, № 1-3, pp. ABS 4-ABS 6, 1993.
- [10] K. Scholle, S. Lamrini, P. Koopmann и P. Fuhrberg, „2  $\mu\text{m}$  Laser Sources and Their Possible Applications,“ в *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, Croatia, INTECH, 2010, pp. 471-500.
- [11] W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, Springer Series in optical sciences, 2007.
- [12] W. J. Mandeville, K. M. Dinndorf и N. E. Champigny, „Characterization of passively Q-switched microchip lasers for laser radar,“ *Proc. SPIE 2748, Laser Radar*

- Technology and Applications*, том 2748, pp. 358-366, 1996.
- [13] B. Cole, L. Goldberg, C. W. Trussell и A. Hays, „Reduction of timing jitter in a Q-Switched Nd:YAG laser by direct bleaching of a Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber,“ *OPTICS EXPRESS*, том 17, № 3, pp. 1766-1771, 2009.
- [14] J. Khurgin, F. Jin, G. Solyar, C. Wang и S. Trivedi, „Timing jitter reduction in diode pumped passively Q-switched laser with composite pumping pulses,“ *Conference on Lasers and Electro-Optics, Technical Digest, paper CThV6.*, 2001.
- [15] J. J. Zayhowski, „Microchip Lasers,“ *THE LINCOLN LABORATORY JOURNAL*, том 3, № 3, pp. 427-446, 1990.
- [16] V. Evtuhov и A. Siegman, „A "Twisted-Mode" Technique for Obtaining Axially Uniform Energy Density in a Laser Cavity,“ *APPLIED OPTICS*, том 4, № 1, pp. 142-143, 1965.
- [17] J. Zayhowski и C. D. III, „Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers,“ *Opt. Lett.*, том 19, № 18, pp. 1427-1429, 1995.
- [18] J. Zayhowski, J. Ochoa и C. D. III, „UV generation with passively Q-switched picosecond microchip lasers,“ *Conf. Lasers Electro-Optics Tech. Dig.*, том 15, p. 139, 1995.
- [19] N. Soleimani, B. Ponting, E. Gebremichael, A. Ribuot и G. Maxwell, „Coilable single crystals fibers of doped-YAG for high power laser applications,“ *Journal of Crystal Growth*, том 393, pp. 18-22, 2014.
- [20] R. S. Feigelson, *Mater. Sci. Eng. B*, том 1, № 1, pp. 67-75, 1988.
- [21] L. M. Frantz и J. S. Nodvik, „Theory of Pulse Propagation in a Laser Amplifier,“ *Journal of Applied Physics*, том 34, № 8, pp. 2346-2349, 1963.
- [22] I. N. Ross, M. Csatàri и S. Hutchins, „High-performance diode-pumped Nd:YLF amplifier,“ *APPLIED OPTICS*, том 42, № 6, pp. 1040-1047, 2003.
- [23] N. Hodgson и H. Weber, „Influence of spherical aberration of the active medium on the performance of Nd:YAG lasers,“ *IEEE J. Quantum Electron.*, том 29, № 9, pp. 2497-, 1993.
- [24] Y. Wang и H. Kan, „Optimization algorithm for the pump structure of diode side-pumped solid-state lasers,“ *Optics and Lasers in Engineering*, том 45, № 1, pp. 93-105, 2007.
- [25] D. Findlay и R. A. Clay, „The measurement of internal losses in 4 level lasers,“ *Phys. Lett.*, том 20, pp. 277-, 1966.
- [26] A. Agnesi, G. C. Reali, V. Kubecek, S. Kumazaki, Y. Takagi и K. Yoshihara, „ $\beta$ -barium borate and lithium triborate picosecond parametric oscillators pumped by a frequency-tripled passive negative-feedback mode-locked Nd:YAG laser,“ *J. Opt. Soc. Am. B*, том 10, № 11, pp. 2211-2217, 1993.

- [27] I. Will, G. Koss и I. Templin, „The upgraded photocatode laser of the TESLA Test Facility,“ *Nucl. Instrum. Meth. A*, том 541, № 3, pp. 467-477, 2005.
- [28] J. Eggleston, T. Kane, K. Kuhn, J. Unternahrer и R. Byer, „The slab geometry laser. I. Theory,“ *IEEE J. Quantum Electron.*, Томове %1 от %2QE-20, pp. 289-301, 1984.
- [29] S. Sinha, J. D. Mansell и R. L. Byer, „Deformable Mirrors for High-Power Lasers,“ *High-Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications III, Proceedings of SPIE*, том 4493, 2002.
- [30] R. Yamamoto, B. Bhachu, K. Cutter, S. Fochs, S. Letts, C. Parks, M. Rotter и T. Soules, „The Use of Large Transparent Ceramics in a High Powered, Diode Pumped Solid State Laser,“ в *ASSP*, Nara, Japan, 2008.
- [31] R. Faoro, M. Kadankov, D. Parisi, S. Veronesi, M. Tonelli, V. Petrov, U. Griebner, M. Segura и X. Mateos, „Passively Q-switched Tm:YLF laser,“ *Opt. Lett.*, том 37, pp. 1517-1519, 2012.
- [32] H. Yu, V. Petrov, U. Griebner, D. Parisi, S. Veronesi и M. Tonelli, „Compact passively Q-switched diode-pumped Tm:LiLuF<sub>4</sub> laser with 1.26 mJ output energy,“ *Opt. Lett.*, том 37, pp. 2544-2546, 2012.
- [33] F. Cornacchia, A. D. Lieto и M. Tonelli, „LiGdF<sub>4</sub>:Tm<sup>3+</sup>: spectroscopy and diode-pumped laser experiments,“ *Appl. Phys. B*, том 96, pp. 363-368, 2009.
- [34] N. Coluccelli, G. Galzerano, D. Gatti, A. D. Lieto, M. Tonelli и P. Laporta, „Passive mode-locking of a diode-pumped Tm:GdLiF<sub>4</sub> laser,“ *Appl. Phys. B*, том 101, pp. 75-78, 2010.
- [35] N. Coluccelli, G. Galzerano, F. Cornacchia, A. D. Lieto, M. Tonelli и P. Laporta, „High-efficiency diode-pumped Tm:GdLiF<sub>4</sub> laser at 1.9  $\mu\text{m}$ ,“ *Opt. Lett.*, том 34, pp. 3559-3561, 2009.
- [36] Y. Du, B. Yao, X. Duan, Z. Cui, Y. Ding, Y. Ju и Z. Shen, „Cr:ZnS saturable absorber passively Q-switched Tm,Ho:GdVO<sub>4</sub> laser,“ *Optics Express*, том 21, № 22, pp. 26506-, 2013.