

**Софийски университет „Св. Климент Охридски”
Физически факултет**



А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

на **Христо Любомиров Илиев**
специалност 01.03.22: „Физика на вълновите процеси (вкл. квантова електроника
и нелинейна оптика)“

на тема

**Диодно напompвани лазери със синхронизация на модовете
излъчващи в спектралния диапазон между 1 и 2 μm**



Научен ръководител: доц. д-р Иван Христов Бъчваров

София

2012

Дисертационният труд е преминал апробация пред първичното звено (катедра Квантова електроника към Физически факултет на Софийски университет) на 06.07.2012 г.

Христо Любомиров Илиев е бил редовен докторант към катедра Квантова електроника към Физически факултет на Софийски университет

от 05.01.2009 г. до 05.01.2012 г., заповед за зачисляване РД 20-1524, от 23.12.2008 г.

Срок на докторантурата удължен със 6 месеца считано от 05.01.2012 г до 05.07.2012 г. заповед № РД 20-257 от 31.01.2012 г.

Отчислен с право на защита със заповед № РД 20-828 от 05.07.2012 г.

Данни за дисертационния труд:

Брой страници: **90**

Брой фигури: **41**

Брой таблици: **4**

Брой на цитирани литературни източници: **90**

Брой публикации на автора по темата на дисертацията: **7**

Брой доклади на международни конференции: **15**

Брой независими цитати на статиите по дисертацията към 06.07.2011 г.: **7**

Съдържание

I. Обща характеристика на дисертационния труд

- 1. Актуалност на темата**
- 2. Цел и задачи на дисертационната работа**
- 3. Научна новост и принос на автора**
- 4. Публикации**
- 5. Обем и структура на дисертацията**

II. Кратко изложение на дисертационния труд

- 1. Диодно напompвани твърдотелни лазери с висока средна мощност**
- 2. Синхронизация на модовете**
- 3. Експериментални резултати**

III. Литература

IV. Списък на публикации и доклади на научни конференции свързани с дисертацията

V. Забелязани независими цитирания на статиите по дисертацията

I. Обща характеристика на дисертационния труд

1. 1 Актуалност на темата

Изминали са повече от 50 г. от получаването на първото кохерентно лазерно лъчение [1]. От тогава до сега лазерите и лазерните технологии търпят бурно развитие главно поради факта, че намират изключително широко приложение в най-разнообразни области на съвременния живот, както в научно-изследователската сфера, така и в множество индустриални приложения и във всекидневния ни живот.

Множеството приложения естествено водят след себе си и до създаване на голямо разнообразие от източници с различни параметри. Всяко специфично приложение изисква специфичен източник. От непрекъснат режим на свободна генерация до получаване на свръх къси светлинни импулси от порядъка на атосекунди (10^{-18} s). Спектрален диапазон, който се простира, макар и не непрекъснато, в целия електромагнитен спектър, от микровълни чак до твърдите рентгенови лъчи (X-ray). Импулсни мощности от порядъка на теравати (TW) и размери от няколко десети от нанометъра до десетки метри.

Още след изобретяването на първия лазер през 1960г. [1], биват разработени редица методи за получаване на лазерни импулси. През 60^{-те}, микросекундият (μ s) (импулсно възбуждане) и наносекундният (ns) (режим на модулация на доброкачествеността) времеви диапазон са изучавани изключително интензивно, както теоретично, така и експериментално. Методът, който позволява да се генерират импулси със субнаносекундна продължителност се нарича „Синхронизация на модовете”. През 70^{-те} развитието на лазерната техника и по-конкретно на техниките за синхронизация на модовете, отваря врати към пикосекундния времеви диапазон, а фемтосекундният диапазон става рожба на 80^{-те}, благодарение на развитието на така наречените „багрилни лазери”. Областта на „свръхкъси” лазерни импулси търпи огромен скок в края на 80^{-те}, с откриването на лазерите базирани на активна среда $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ (Ti-сапфир) [3], която е първата твърдотелна среда, която може да поддържа свръхкъси лазерни импулси без да се налага охлаждането ѝ до криогенни температури. Новата среда има уникални свойства и параметри, които по това време се различавали от всичко познато (основно багрилни лазери, които се използвали за получаване на свръхкъси лазерни импулси). Много по-дългото време на живот на горното лазерно състояние и по-малкото сечение за стимулиране излъчване (и двете в сравнение с използваните до тогава багрилни лазери), правят съществуващите техники за синхронизация на модовете неизползваеми. Както се казва в обзорна статия от 2001 [4], „пасивните техники за генерация на свръх къси импулси съществуващи по това време трябваше да бъдат преразгледани в контекста на параметрите на новата среда“(свободен превод).

Само няколко години по-късно усилията насочени към тази нова, уникална среда водят до усвояването и на нова техника за синхронизация на модовете базирани на нелинейност от трети порядък, формираща така наречената леща на Кер (**Kerr Lens Mode-locking - KLM**) в лазерния кристал [5]. Техника, която съвсем не е идеална и има някой много сериозни недостатъци. По същото време, като алтернатива на KLM, се появява и нова техника базирана на насищане на поглъщането в системи с две състояния, или по скоро се появява нов тип насищаем абсорбер. Така наречените огледала с полупроводников насищаем абсорбер (**Semiconductor Saturable Absorber Mirror - SESAM**), специално проектирани за потискане на появата на Q-модулация и смесен режим на синхронизация на модовете с Q-модулация [6]. Повече от 20г. по-късно, това все още са най-широко разпространените и добре усвоени техники, за получаване на свръхкъси лазерни импулси, като спектралният диапазон между 800 nm

и 1064 nm е най-добре усвоен в принципно и техническо отношение. В последните години, фокусът на научната общност се измества от този диапазон и все по-голям интерес, дължащ се на множеството потенциални приложения, се проявява към източници излъчващи в близката и средната инфрачервена област. Техническият прогрес и развитието на полупроводниковите лазерни диоди, позволи създаването и на достъпни наpomпващи източници с висока средна мощност, висока яркост, излъчващи в широк спектрален диапазон, като на практика покриват ивиците на поглъщане на всички твърдотелни лазерни среди излъчващи в диапазон между 1 и 2 μm . Диодното наpomпване позволява изграждането на твърдотелни лазерни системи с висока ефективност, дълъг живот, надеждност, компактни размери, и ниска цена. Характеристики от изключително голямо значение за всички реални приложения. Всичко това превръща диодно наpomпваните твърдотелни лазери в атрактивни източници на мощно кохерентно лазерно лъчение в спектрален диапазон между 1 и 2 μm . Получаването на свръх-къси лазерни импулси в този диапазон, обаче, остава трудна задача. Съществуващите техники за синхронизация на модовете, изпитват сериозни затруднения и надеждни такива все още несъществуват и са в процес на разработване.

1.2. Цел и задачи на дисертационният труд

Целта на настоящата работа е *синхронизация на модовете в диодно наpomпвани твърдотелни лазери с висока средна мощност, излъчващи в близката инфрачервена област между 1 и 2 μm .*

По конкретно задачите могат да се формулират като:

1. Разработване и тестване на нова техника за синхронизация на модовете посредством $\chi^{(2)}$ -леща в Nd^{+3} дотирани ортованадатни среди с тесен спектър на усилване.
2. Разширяване на спектралния диапазон и прилагане на разработената техника за синхронизация на модовете в Nd^{+3} лазери, излъчващи около 1.3 μm , където надеждни техники за синхронизация на модовете все още не съществуват, докато наpomпването им с лазерни диоди е добре развито.
3. Разработване на лазерна система с пасивна синхронизация на модовете, генерираща серия от пикосекундни импулси при импулсно наpomпване, с цел повишаване на енергията в единичен импулс. Получаване на kHz-последователност на серията от пикосекундни импулси при лазерите с пасивна синхронизация на модовете и електрооптична обратна връзка.
4. Изследване на алтернативен метод за пасивна синхронизация на модовете в близкия ИЧ-диапазон посредством насищане на поглъщането във филм от въглеродни нанотръбички в $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ лазер, излъчващ на 1.3 μm .
5. Синхронизация на модовете в лазери с нови активни среди подходящи за диодно възбуждане, като $\text{Nd}:\text{LuVO}_4$, прилагайки разработената техника за пасивна синхронизация на модовете посредством $\chi^{(2)}$ -леща.
6. Синхронизация на модовете в Tm дотирани лазери, излъчващи в спектралния диапазон около 2 μm .

1.3. Постигания и принос на автора

Разработена е нова техника за пасивна синхронизация на модовете, приложима за среди с тесен спектър на усилване, базирана на $\chi^{(2)}$ -леща в нелинейния кристал.

- Техниката е приложена в конструирани за целта пикосекундни лазерни осцилатори с висока средна мощност ($>5\text{W}$) с непрекъснато диодно

напомпване. Тествани са различни нелинейни $\chi^{(2)}$ -среди с квази-фазов синхронизъм.

- Установен е режим на работа, при който изходната мощност на лазера с пасивна синхронизация на модовете е близка до максималната стойност получена от него в непрекъснат режим на работа и нулев гаусов мод TEM₀₀.

Реализиран е пикосекунден лазерен осцилатор с висока средна мощност и непрекъснато диодно напомпване в спектралния диапазон около 1.3 μm .

- Получени са импулси с рекордна продължителност от 3.6 ps, генерирани от Nd⁺³ дотиран лазер работещ на прехода около 1342 nm
- Експериментално са показани предимствата на схемата за напомпване директно в ивицата на усилване (in band pumping), използвайки напомпващи диоди с дължина на вълната около 880 nm

Разработена е система с надлъжно импулсно напомпване, с цел повишаване на енергията в единичен импулс, работеща в режим на пасивна синхронизация на модовете и отрицателна обратна връзка.

- Получена е енергия в единичен импулс от порядъка на 150 nJ, на порядък по-голяма от типичните енергии в лазерите с непрекъснато напомпване. Експериментално е показана ефективната работа на системата за отрицателна обратна връзка при потискането на появата на Q-модулация, стабилизиране на амплитудата на отделните пикосекундни импулси и бързото установяване на квазистационарен режим на генерация. Полученото изходното лъчение е с качествен фактор $M^2 < 1.2$.

Реализиран е алтернативен метод за пасивна синхронизация на модовете, посредством насищане на поглъщането във филм от въглеродни нанотръбички.

- За първи път абсорбер от подобен тип е използван в тесноивичен, Nd⁺³ дотиран, лазерен кристал, излъчващ в спектралния диапазон около 1.34 μm .

Реализиран е режим на пасивна синхронизация на модовете с най-новия представител на семейството на ортованадатите, Nd:LuVO₄.

- Получени са импулси с рекордна продължителност, 1.6 ps, генерирани от Nd⁺³ дотирани лазерни кристали.

Реализиран е режим на пасивна синхронизация на модовете в Tm⁺³-дотирани лазерни среди (Tm:KLuW и Tm:LiLuF) излъчващи в спектралния диапазон около 2 μm .

1.4. Публикации

Резултатите от работата по дисертацията са публикувани в четири статии в списания с импакт фактор и една, която в момента е в процес на подготовка: една публикация в *Optics Letters* (импакт фактор (ИФ) за 2010 година 3.318), две публикации в *Optics Express* (ИФ - 3.753), една публикация в *Applied Physics B* (ИФ - 2.239), 3 доклада публикувани в пълен текст в издания на SPIE от международни конференции. Участие на всички големи международни научни конференции в областта през

последните три години (CLEO, CLEO Europe, ASSP и SPIE Photonics West), както и на прояви от местно ниво с общо 15 доклада.

Статията излязла в брой 35 на списание Optics letters, по-късно е избрана от американското физично общество (APS) и американския физичен институт (AIP) за повторно публикувана в броя от месец Май 2010г. на виртуално списание в областта на науката и технологията в раздела за свръх бързи процеси ([Virtual Journal in science and technologies, section - Ultrafast Science.](#))

1.5. Обем и структура на дисертацията

Прегледаният за защита дисертационен труд е представен на 89 страници, с изчерпателно описание на свършената работа и получените резултати. Работата съдържа 41 фигури и 34 таблици, като са цитирани 90 литературни източника.

Дисертацията е структурирана по следния начин:

Увод, две части - **I** и **II**, с обзорец характер, част **III** - съдържаща основните експериментални резултати от работа по дисертацията, **IV** - заключение, **V** - използвана литература, **VI** - списък на публикации и доклади на научни конференции по дисертацията, **VII** - забелязани независими цитирания на статиите по дисертацията.

В **част I** е направен кратък обзор на диодно напompваните лазерни системи с висока средна мощност. В **част II** е разгледан принципно режима синхронизация на модовете. Описани са етапите на формиране на свръх къси лазерни импулси съгласно флукуационният модел, въведен от Летохов през 70^{-те} години на миналият век [8]. Разгледани са различните техники за синхронизация на модовете, като основно внимание е обърнато на пасивните методи, използвани в системи с висока средна мощност. В **част III**, разделена на шест подточки, подробно са описани основните експериментални резултати от работата по дисертацията.

II. Кратко изложение на дисертационния труд

2.1. Диодно напompвани лазери с висока средна мощност

Диодно напompваните лазери, работещи в непрекъснат CW (continuous wave) режим генерират стотици вата изходна мощност още от 90^{-те} години на миналият век. В стационарен режим на синхронизация на модовете, обаче получаването на мощности от порядък дори на няколко вата е не лека задача.

Основна причина за това са изискванията за работа при нулев напречен гаусов мод TEM₀₀ и отсъствие на смесен режим на Q-модулация и синхронизация на модовете. Две условия, които трябва да бъдат удовлетворени задължително, особено при системи с висока средна и импулсна мощност, където пасивните модулатори често работят на границата в своите възможности.

Концепцията, показала най-добри резултати за скалиране на изходната мощност в диодно напompвани твърдотелни лазерни системи, работещи в режим на синхронизация на модовете, са така наречените „дискови лазери” (thin disk lasers) на основата на Yb дотирани среди. За първи път енергия в единичен импулс от порядък на „μJ” е получена преди повече от едно десетилетие, през 2000г., където за първи път дисков лазер на основата на Yb:YAG генерира средна изходна мощност от ~ 16 W в режим на си синхронизация на модовете[1]. През 2004г. в същата среда, средната мощност е вече в пъти по-голяма и достига 80W [2], докато в момента съществуват системи, които генерират поредица от фемтосекундни импулси със средна изходна мощност повече от 140 W [3,4].

Другата алтернатива за получаване на висока средна мощност е по стандартния подход, използвайки конфигурация с надлъжно или напречно напompване в среди

дотирани с Nd^{+3} йони, като Nd:YAG , Nd:YLF и различните представители на семейството на ортованадатите (Nd:YVO_4 , Nd:GdVO_4 и Nd:LuVO_4).

При конфигурациите с напречно напompване, лесно се постига голяма плътност на напompващата мощност, но обикновено тя изпълва целия обем на активната среда и за работа при нулева гаусов мод TEM00 е нужно да се вземат допълнителни мерки. В подобна конфигурация, от един модул с напречно напompване с 2x20 W непрекъснати лазерни диоди *G. J. Spuhler et. al.* получават повече от 10 W средна изходна мощност в стационарен режим на синхронизация на модовете [5].

През последните години се появи и една нова разновидност на напречното напompване, чрез която са получени много обещаващи резултати. Така наречената геометрия на „плъзгащо падане“ (grazing incidence). При нея, комбинацията от голям коефициент поглъщане и малък размер на петното създават област, започваща от самата гранична повърхност на кристала, с много малък обем и висока плътност на напompването, което осигурява изключително високо усилване. Лазерният резонатор е конструиран така, че неговият нулев мод да съвпадне с този регион на голямо усилване, като лазерният сноп търпи пълно вътрешно отражение на граничната повърхност между кристала и заобикалящия го въздух (плъзгащо падане). Максималната мощност в стационарен режим на синхронизация на модовете достига почти 17 W [6].

Другата стандартна и широко-разпространена конфигурация е така нареченото надлъжно напompване. При него сравнително лесно се удовлетворява условието размерът на напompването да е по-малък или равен на размера на нулевият гаусов мод на резонатора, но по-трудно в активният елемент се въвежда голяма средна мощност и трябва да се вземат специални мерки за формиране на резонатор притежаващ нулев гаусов мод с голям обем. Едно от решенията на проблема, предложено от Louis McDonagh и Richard Wallenstein, е използването на динамично стабилен резонатор с изпъкнали огледала, в комбинация напompване директно в ивицата на усилване посредством лазерни диоди излъчващи около 888 nm. Те получават 56 W в режим на синхронизация на модовете директно от лазерния осцилатор [7].

От направеното по-горе разглеждане става ясно, че има голям интерес към лазерни системи, работещи в режим на синхронизация на модовете с висока средна мощност като достъпна алтернатива на скъпите и сложни системи на основата на Ti-сапфир лазери. В този смисъл, надеждността, компактни размери в комбинация с проста оптична схема и сравнително ниска цена, са основни изисквания.

Съществен напредък в системите с висока средна мощност се забелязва едва през последните десет години, като всички резултати със средна мощност над 60 W получена директно от лазерния осцилатор са посредством дискови лазери на основата на среди дотирани с Yb^{+3} йони. Концепция позволяваща скалиране на изходна мощност и генерация на импулси със субпикосекундна продължителност, но сложна, скъпа и трудна за реализация. Също така, Yb^{+3} , като система с три състояния изисква голяма плътност на напompващата мощност, което сравнително лесно се постига при концепцията на дисковите лазери и позволява скалиране на изходната мощност, но в стандартна конфигурация с надлъжно напompване, това изисква лазерни диоди с висока яркост, каквито не съществуват при висока средна мощност и често се налага така нареченото лазерно-лазерно напompване, посредством напompващи източници от типа на Ti-сапфир лазери, работещи в непрекъснат режим.

От друга страна лазерните среди дотирани с Nd^{+3} йони, особено тези от семейството на ортованадатите, които осигуряват импулси с продължителност от порядъка на единици пикосекунди, са много по-подходящ и широко използвани при изграждане на системи с висока средна мощност. Като система с четири състояния,

Nd^{+3} позволява ефективна генерация при много по-ниски плътности на напompването, което съществено намалява изискванията към напompващите лазерни диоди и позволява използването на съществуващите комерсиални източници с висока средна мощност.

2.2 Синхронизация на модовете

Принцип на действие

Идеята за „фазова синхронизация на модовете“, или „синхронизация на модовете“ е позната от 60-те години на миналият век, още в зората на лазерната техника, но развитието на технологиите е позволило надеждни методи за получаване на свръх къси лазерни импулси да се създадат едва през последните 20 – 25 години.

В честотното пространство, изходният сигнал от всеки лазерен осцилатор е резултат от интерференцията на всички съществуващи надлъжни модове и в общият случай той е силно флукутиращ във времето. Ако въведем връзка между фазите на отделните генерирани надлъжни модове (фазово ги синхронизираме) този силно флукутиращ във времето сигнал може да се превърне в добре дефиниран, циркулиращ в резонатора, единичен импулс.

Методи за синхронизация на модовете

Въвеждането на фазова връзка между отделните модове (фазовото им синхронизиране) може да стане чрез въвеждане на елемент с подходяща нелинейност или външно управляван оптичен модулатор, който модулира параметрите на лазерният резонатор (обикновено това са загубите). В първият случай, говорим за пасивна синхронизация на модовете, при който самото лазерно лъчение в комбинация с пасивен нелинеен елемент създава периодична модулация на загубите, водеща до фиксирана връзка между фазите на отделните надлъжни модове. Във вторият случай говорим за активна синхронизация на модовете, тъй като се използва външен сигнал, приложен към оптичния модулатор (например акустооптичен или електрооптичен), който създава периодична модулация на загубите и аналогично води до сфазирание на отделните надлъжни модове.

Синхронизация на модовете посредством насищаем абсорбер – етапи на формиране на импулса

През 1972г. Letokhov въвежда така нареченият „флукутиационен“ модел, който описва формирането на импулса в твърдотелни лазери с насищаем абсорбер [1].

Еволюцията на един импулс генериран от лазер, работещ в режим на синхронизация на модовете може да бъде разделена на няколко обособени етапа:

Първи етап - с начало на напompването инверсната населеност нараства, започва усилване на спонтанната емисия. Когато коефициентът на усилване надвиши загубите лазерът достига така нареченият първи праг – *прага на генерация*.

Втори етап - линейно усилване в активната среда и линейно поглъщане в абсорбера, протичащ при интензитет много по-малък от интензитета на насищане (I_s).

Трети етап - е линейно усилване в активната среда и нелинейно поглъщане в абсорбера, която настъпва при интензитет от порядъка на I_s ;

Четвърти етап – етап на нелинейно усилване в активната среда и почти никакво поглъщане в абсорбера (напълно наситен абсорбер), която настъпва при интензитет много по-голям от I_s .

Формирането на лъчението в лазерите с пасивна синхронизация на модовете се осъществява през линейния и нелинейния етап, където поради големият интензитет, основно влияние имат ефектите на само-модулация, които въздействат на структурата на лъчението. Последният етап е много важен от друга гледна точка. Дали интензитетът

на така формирания през предните два етапа импулс е достатъчен за да снесе цялата инверсна населеност (да насити усилването в активния елемент) или не? В зависимост от това са възможни два режима. При първия, импулсът е достатъчно интензивен за да насити усилването в активния елемент и в зависимост от напompването явно се наблюдават два прага – праг на свободна генерация и праг на стационарен режим на синхронизация на модвете. Поради това, този режим често се нарича „*двупрагов*”. При него се получават импулси с минимална продължителност и добра възпроизводимост на параметрите.

При втория режим, интензитетът на формирания в третата фаза импулс не е достатъчен за да насити усилването и то продължава да нараства и през последната фаза. Този режим обикновено води до получаване на нискочестотни флуктуации в амплитудата на получените импулси и смесен режим на Q-модулация и синхронизация на модовете.

2.3 Експериментални резултати

По време на работата по дисертацията бяха проведени множество експерименти с различни лазерни среди и нелинейни кристали, в различни конфигурации на резонатора, които доведоха до голям обем експериментални резултати. Поради тази причина експерименталната част заема повече от 2/3 от обема на цялата дисертация.

Първите проведени експерименти имаха за цел разработване и тестване на нова техника за синхронизация на модовете посредством разсейвателна $\chi^{(2)}$ -леща в Nd-ортованадатни лазери с тесен спектър на усилване и сравнение на получените резултати с данните от литературата. В последствие новата техника беше приложена в спектралния диапазон около 1342 nm, където е вторият по интензивност, излъчвателен преход на неодима и където надеждни техники за синхронизация на модовете все още не съществуват. В същия спектрален диапазон беше тестван и нов тип насищаем абсорбер на основата на въглеродни нанотръбички (CNT). С цел повишаване на енергията в единичен импулс беше разработена система с импулсно, надлъжно напompване и имплементирана система за отрицателна обратна връзка (ООВ), излъчваща в диапазона около 1 μm . Новата техника за синхронизация на модовете беше приложена и в най-новия представител на семейството на ортованадатите (Nd:LuVO₄), напompван директно в ивицата на усилване (in-band pumping). Накрая са показани някои предварителни експериментални резултати от работата по тулиев (Tm⁺³) лазер, излъчващ в диапазона около 2 μm .

Разработване и тестване на нова техника за синхронизация на модовете посредством $\chi^{(2)}$ -леща в Nd⁺³ дотирани ортованадатни среди с тесен спектър на усилване

Както вече стана дума в т. II от настоящата работа, лазерните среди дотирани с Nd⁺³ йони, особено тези от семейството на ортованадатите, са подходящ кандидат за изграждане на пикосекундна система с висока средна мощност. Ако се върнем към критериите за избор на лазерна среда, дефинирани в същата точка, те притежават голямо сечение за поглъщане ($> 5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$) около 808 nm, където съществуват комерсиални лазерни диоди с висока средна мощност и голямото сечение за стимулирано излъчване ($> 10 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$), което в комбинация със сравнително малкото време на живот на горното лазерно състояние ($< 100 \mu\text{s}$) ги прави много подходящи за работа в режим на синхронизация на модовете, като улеснява насищането на усилването в последната фаза от формирането на импулса и установяване на стационарен режим на генерация на свръхкъси лазерни импулси. Добрата им топлопроводимост (близка до тази на Nd:YAG), в комбинация с високия праг на разрушение, позволяват скалиране и работа при висока средна мощност.

Колкото до изборъ на пасивна техника за синхронизация на модовете подходяща за система с висока средна мощност и среда с тесен спектър на усилване, каквито са Nd^{+3} дотираните среди, възможностите са доста ограничени.

Синхронизацията на модовете посредством нелинеен ефект на Кер, която е много добре усвоена и се прилага в комерсиални лазерни системи, използва нелинейност от трети порядък ($\chi^{(3)}$). Това от една страна позволява да се използва изключително бързия отклик на средата за пасивна модулация на загубите, което позволява да се генерират трансформационно ограничени импулси, но от друга страна, поради същата причина, този метод е приложим само за среди с широк спектър на усилване, като например Ti-сапфир, където в началните етапи на развитие на генерация, когато полето има вида на гаусов шум, има пикове с достатъчно голяма интензивност и кратка продължителност, за да задействат ефекта на самофокусиране, който в комбинация с подходяща апертура, води до съществена модулация на загубите и до режим на синхронизация на модовете.

Най-популярният метод, приложим за среди с тесен спектър на усилване е синхронизация на модовете посредством насищане на поглъщането в различни среди. В спектралния диапазон около 1 микрон това са основно огледала с полупроводников насищаем абсорбер (**Semiconductor Saturable Absorber Mirror - SESAM**). Този метод е широко разпространен и добре усвоен, но той има някои съществени недостатъци, които всъщност са присъщи на всички устройства базирани на поглъщане:

1. На първо място, той принципно не е подходящ за системи с висока средна мощност, тъй като е базиран на поглъщане и подобна система би работила на границата на възможностите на абсорбера, като всяка малка флуктуация или поява на Q-модулация в режима на работа (режим, към който тези системи са принципно склонни) може лесно да доведе до локална повреда.

2. Технологиата на производство на полупроводникови насищаемите абсорбери е много скъпа и сложна (изисква отлагане на множество слоеве от различни типове полупроводници в условията на „чиста стая“, както и допълнителна обработка за имплантиране на дефекти в забранената зона, чрез което времето на релаксация на абсорбера се намалява до fs). До момента тя е добре усвоена само в спектралния диапазон около 1000 nm. С увеличаване на дължината на вълната възникват множество технологични проблеми, които правят създаването на ефективни и надеждни устройства с малко остатъчно поглъщане и добри оптични качества, много труден и до момента невъзможен процес. За системи с висока средна мощност, е необходимо оптимизация на дълбочина на модулация, което е много сериозен проблем за тези устройства, тъй като е много трудно тя да се оптимизира независимо от остатъчното поглъщане.

3. Методът съвсем не е универсален. Всеки абсорбер е проектиран и изработен само за тесен диапазон около дадена дължина на вълната.

Поради тези причини, метода, върху който бяха съсредоточени основна част от усилията и работата по дисертацията е пасивна синхронизация на модовете посредством формиране на разсейвателна $\chi^{(2)}$ -леща в нелинейния кристал за ГВХ. Метод, който има няколко много съществени предимства пред всички останали:

1. Той се основава на вътрешно-резонаторна ГВХ в различни нелинейни среди, които не поглъщат лазерното лъчение. Това прави методът изключително подходящ за системи с висока средна и импулсна мощност

2. ГВХ е нелинеен процес, използващ нелинейност от втори порядък ($\chi^{(2)}$), което го прави напълно приложим за среди с тесен спектър на усилване, каквито са Nd^{+3} дотираните среди, като в същото време, отново използва изключително бързия отклик

на средата, което позволява генерация на трансформационно ограничени импулси (в случая с Nd^{+3} дотирани среди това са единици пикосекунди).

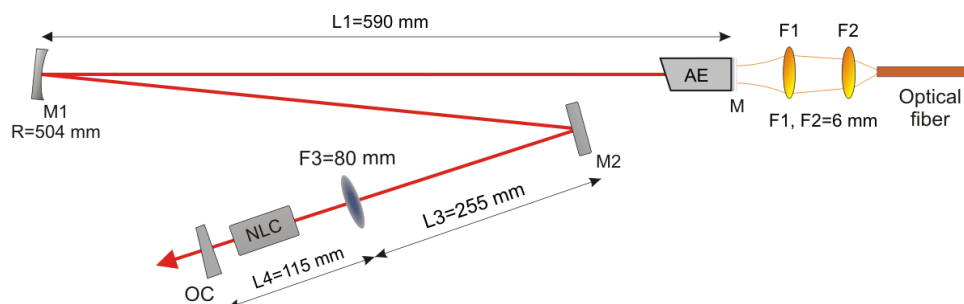
3. Методът е универсален и принципно приложим във всеки спектрален диапазон, където съществуват ефективни лазерни среди и кристали за генерация на втора хармонична.

4. Позволява използване на периодично поляризирани нелинейни кристали – инженерингова нелинейна оптика, където чрез промяна на периода на поляризация на нелинейният кристал лесно може да се удовлетвори условието за фазов синхронизъм в целият диапазон на прозрачност на кристала, като същевременно се използва направлението с най-голяма нелинейност, което е непостижимо с конвенционалните двулъчепрекупващи нелинейни кристали.

В случая, когато за синхронизация на модовете се използва първи тип ГВХ, са възможни две физически различни механизма за модулация на вътрешно резонаторните загуби. Първият механизъм е на основата на интензитет-зависимото отражение от НЛО, [1–4], известен още от края на осемдесетте години на миналият век. Основният недостатък на този механизъм за генерация на къси лазерни импулси е, че импулсът, циркулиращ в резонатора има по-малка продължителност от тази на естественият изход на лазера [5]. Също така, обикновено НЛК кристал работи при условие на точен фазов синхронизъм, което го прави принципно неподходящ за системи с висока средна мощност.

Вторият механизъм се базира на така наречената $\chi^{(2)}$ -леща, която се формира в нелинейният кристал [6]. Този метод не притежава ограниченията на НЛО за продължителността на генерираните импулси [7].

В тази първа работа изследвах режима на пасивна синхронизация на модовете в $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ лазер чрез вътрешно-резонаторна ГВХ във периодично поляризиран КТР нелинеен кристал. Ефектът на формиране на разсейвателна $\chi^{(2)}$ -леща в нелинейния кристал е основен физически механизъм, който допринася за формиране и скъсяване на импулсите до минимална продължителност от 2.9 ps, докато ефекта на амплитудна модулация посредством нелинейно отражение от НЛО, има незначителна роля за стартиране на режима на синхронизация на модовете и дълговременната стабилност на лазера.

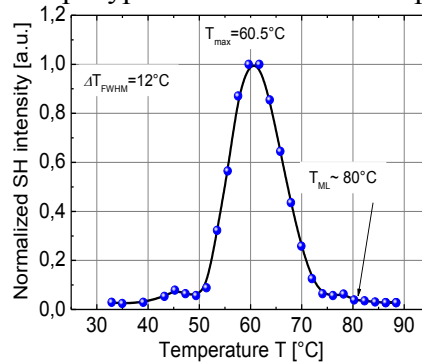


Фиг. 1 Схема на лазерния резонатор: F1, F2 – напмпващ обектив; AE - $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ активен елемент; M, M1, M2 – високо отражателни за лазерната дължина на вълната, F3 – фокусираща леща, NLC – периодично поляризиран КТР нелинеен кристал, OC – изходно огледало.

Използваната експериментална постановка е показана на Фиг.1. Активният елемент (AE) е клиновиден, $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ лазерен кристал с дължина 5 mm, апертура $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ и концентрация на активни йони от 0.4 at. %. Двете крайни огледала на резонатора са глухото огледало, нанесено директно върху задното чело на активния елемент, което също така е просветлено за напмпването и плоско изходно огледало. Използвана е схема за надлъжно напмпване на $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ активен елемент

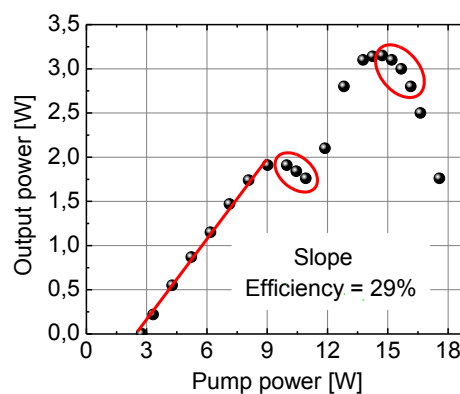
посредством 808 nm лазерен диод коплиран в оптично влакно с диаметър 400 μm и числова апертура $NA=0.22$. Снопът от оптичното влакно е фокусиран в активния елемент, до петно с радиус от $\sim 200 \mu\text{m}$, посредством обектив с увеличение 1, през задното огледало M, което е просветлено за напмпващата дължина на вълната (фиг. 1).

За генерация на втора хармонична беше използван 5 mm дълъг, периодически поляризиран калиев-титаниев-оксид-фосфат KTiOPO_4 (КТР), с дебелина 1 mm (по оста z) и 5 mm широк (по оста y). Условието за фазов синхронизъм в случая се контролира посредством промяна на температурата на нелинейния кристал.



Фиг. 2. Интензитета на втората хармонична, нормиран към единица, като функция на температурата на нелинейния кристал (T) измерена в непрекъснат режим.

Измерената зависимост на интензитета на втората хармонична като функция на температурата на нелинейния кристал, има максимум при 60.5°C (температура на държача на нелинейният кристал) и ширина на половин височина от $\sim 12^\circ\text{C}$ (виж фиг.2). Стабилен режим на синхронизация на модовете се получава при по-висока температура, около 80°C , като оптималната температура се променя в рамките на $\pm 4^\circ\text{C}$ за всеки отделен експеримент.

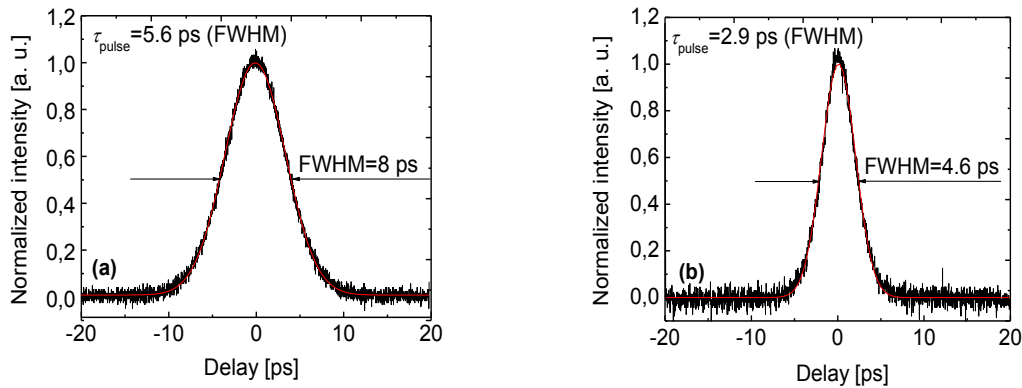


Фиг. 3. Зависимост на изходната мощност от напмпването в Nd:YVO_4 лазер с изходно огледало с $T=30\%$ за лазерната дължина на вълната. Областите на стабилен режим на синхронизация на модовете са маркирани с овали

Най-голямата ефективност и изходна мощност в режим на синхронизация на модовете беше получена с изходно огледало с 30 % пропускане за основното лъчение и високо отражение за втората хармонична. На фиг. 3 е показана зависимостта на изходната мощност от напмпващата. Режим на синхронизация на модовете се получава в два различни диапазона от напмпващи мощности (маркирани с овал на фиг.3). И в двата диапазона изходната мощност намалява с увеличаване на напмпващата мощност.

Това нетипично поведение беше изследвано чрез моделиране на разпределението на интензитета на лъчението в резонатора, което показва наличие на две различни зони на стабилност в зависимост от топлинната леща, която се формира в Nd:YVO_4 лазерен

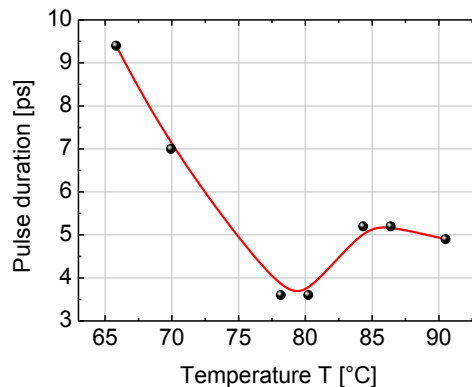
кристал. В края на тези зони модът в резонатора се променя драстично, което води до намаляване на ефективността в следствие на неоптималното припокриване на резонаторният мод и напмпването.



Фиг. 4. Автокорелационна функция с изходно огледало с $T=30\%$ (a) и $T=5\%$ (b). Кривите са измерени с помощта на конструиран за целта, непрекъснато сканиращ, автокорелатор.

Най-голямата изходна мощност (3.1 W) в режим на синхронизация на модовете се получава при напмпване от 15 W. В този случай ширината на половин височина на измерената автокорелационна функция е 8 ps фиг. 4(a), което отговаря на 5.2 ps продължителност на импулса, приемайки sech^2 форма. Най-къс импулс (2.9 ps) бяха получени с изходно огледало с пропускане от 5% (фиг. 4(b)).

Когато за синхронизация на модовете се използва дихроично огледало с пропускане за основното лъчение и високо отражение за втората хармонична и двата процеса на нелинейно отражение от НЛО и формирането на $\chi^{(2)}$ -леща участват едновременно във формирането на импулса.



Фиг. 5. Продължителност на измерените импулси от Nd:YVO4 лазер като функция на температурата на нелинейния кристал T (условието за фазов синхронизъм)

За анализ на относителният принос на всеки от двата ефекта, за първи път беше изследвана зависимостта на продължителността на импулсите от температурата на нелинейния кристал, фиг. 5, (условието за фазов синхронизъм). Близко до максимума (точен фазов синхронизъм), където приносът на НЛО е най-голям, продължителността на измерените импулси е най-голяма (> 9 ps) и намалява с увеличаване на температурата на нелинейния кристал, достигайки минимум от < 4 ps, при температура от 80°C , където приносът на НЛО е пренебрежимо малък и импулсите се формират в следствие на фазовата модулация от ефекта на $\chi^{(2)}$ -леща в нелинейния кристал. Тук приносът на НЛО във формирането и скъсяването на импулса е незначителен. То спомага за самостартирането на режима на синхронизация на

модовите и дълговременната стабилност. По нататъшното увеличение на температурата води до увеличаване на продължителността на импулсите. В тази област, където НЛЮ няма никакъв принос, лазерът работи по-нестабилно, като режимът на синхронизация на модовете е силно чувствителен към външни пертурбации, което затруднява и оптимизирането на продължителността на импулсите.

Основен резултат от проведените експерименти е, че стабилен режим на синхронизация на модовете може да се получи при стойности на изходната мощност близка до тази генерирана от лазера в непрекъснат режим и нулев гаусов мод TEM00. Получената изходна мощност е почти на един порядък по-висока от тази в [6], където $\chi^{(2)}$ -леща формирана в периодично поляризиран КТР нелинеен кристал е използвана за получаване на режим на синхронизация на модовете в Nd:GdVO4 лазер или [1] където комбинация от НЛЮ, на базата на КТР нелинеен кристал е използвана в Nd:YVO4 лазер. В [6] се наблюдава една работна точка докато в експериментите описани по-горе е възможно получаване на цял диапазон стабилен режим на синхронизация на модовете. Максималната изходна мощност е близка до максималната получена с НЛЮ (5.6 W в [1]) със същият лазерен кристал, но продължителността на импулсите в този случай е 20-ps, приблизително 4 пъти по-голяма от колкото в нашия случай. Допълнително скалиране на изходната мощност може да се получи чрез оптимизиране на лазерния резонатор, като се вземе предвид значението на топлинната леща и се проектира резонатор работещ при по-високи напompващи мощности, като ограничението отново ще бъде, максималната мощност получена в непрекъснат режим и TEM00.

Макар, големият ефективен нелинеен коефициент на периодично поляризиран КТР нелинеен кристал да осигурява лесно самостартиране на режима на синхронизация на модовете, при него са на лице някои вредни ефекти свързани с частично поглъщане на втората хармонична, които ограничават неговото приложение в системи с висока средна мощност [8]. С цел цялостно изследване на режима и получаване на по-висока средна мощност, бяха проведени и множество други експерименти с различни лазерни среди и нелинейни кристали, като най-добри резултати в смисъл на максимална изходна мощност получихме използвайки Nd:GdVO4 активен елемент в комбинация с периодично поляризираният, стехиометричен литиев танталат, дотиран с магнезий (MgSLT) нелинеен кристал.

Последният има ефективна нелинейност съизмерима с тази на периодично поляризиран КТР нелинеен кристал, като не показва подобни термични проблеми свързани с поглъщането на втората хармонична [9], което го прави много подходящ за приложение в системи с висока средна мощност.

Максималната получена изходна мощност достига 5W, (използвайки дихроично огледало с пропускане $T=30\%$ за основното лъчение и високо отражение за втората хармонична), съизмеримо с най-добрите резултати получени в [1], ограничена само от същата получена в непрекъснат режим и нулев напречен гаусов мод TEM00, като продължителността на генерираните импулси в случая е 6.5 ps. Посредством намаляване на пропускането на изходното огледало до 5 %, получихме минимална продължителност на генерираните импулси от 3.2 ps, при максимална изходна мощност от 1.4 W. Поведението на системата е подобно на вече описаната, като по-добрите качества на периодично поляризирания MgSLT нелинеен кристал позволяват значително повишаване на изходната мощност, като продължителността на генерираните импулси остава от същия порядък.

Разширяване на спектралния диапазон и прилагане на разработената техника за синхронизация на модовете в Nd⁺³-лазери излъчващи около 1.3 μm

След получаването на добрите резултати описани в предишната точка, следващата естествена стъпка беше, разширяването на спектралният диапазон, показвайки, че описаната техника за синхронизация на модовете е приложима и в диапазон където други надеждни техники все още не съществуват.

Източник от типа на Nd^{+3} дотирани лазерни среди, работещи на втория излъчвателен преход (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$) на неодима, с централна дължина на вълната на излъчване около 1342 nm, работещ в режим на синхронизация на модовете, може да се използва за редица приложения в полупроводниковата индустрия, телекомуникациите и медицината.

За първи път режим на синхронизация на модовете в диодно напompван лазер от този тип е постигнат посредством така нареченият метод със „сумиране на импулси” (additive pulse mode-locking) [10]. В наши дни се използва много по-простата за реализация схема, включваща полупроводников насищаем абсорбер, за получаване на режим на синхронизация на модовете, която, както вече беше споменато, е широко разпространена в диапазона около 1 μm , но с увеличаване на дължината на вълната, отивайки по-навътре в близката инфрачервена област около 1.3 μm , възникват множество технически и инженерни проблеми, които ограничават оптичните качества на създадените устройства.

Първата демонстрация на стационарен режим на синхронизация на модовете в Nd дотирани среди работещи на прехода около 1.3 μm , датира от далечната 1996 г [11]. В тази работа е получен стабилен режим на синхронизация на модовете в Nd:YVO₄ и Nd:YLF лазери, използвайки специално проектиран за целта полупроводников насищаем абсорбер. Получената максимална изходна мощност в режим на синхронизация на модовете е 50 и 130 mW, при продължителност на импулса от 4.6 ps и 5.7 ps, съответно за Nd:YVO₄ и Nd:YLF лазера. В последствие, други групи също демонстрират подобен режим на работа с различни видове полупроводникови насищани абсорбери, като основната цел е да се подобрят оптичните качества на използваните абсорбери за получаване на по-висока изходна мощност и дълговременна стабилност. Най-добри резултати, в смисъл на максимална изходна мощност (1.05 W при честота на повторение от 152 MHz), е получена в [12], използвайки насищаем абсорбер на основата на AlGaInAs. Продължителността на импулсите обаче е далеч от възможностите на средата (26.4 ps).

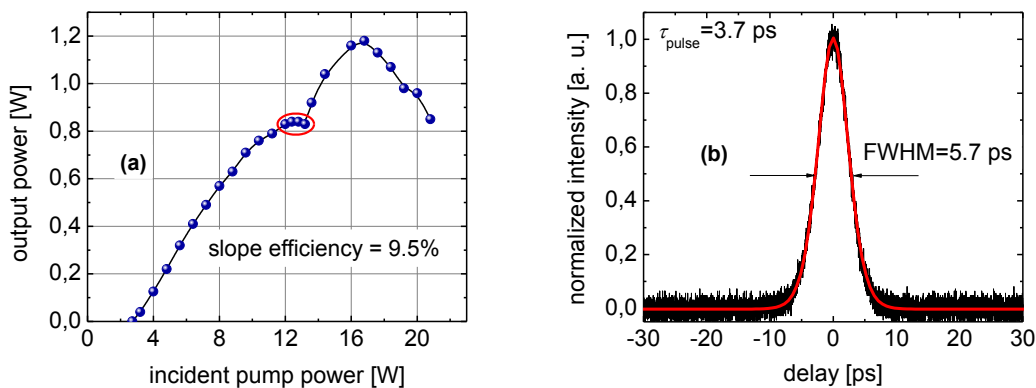
В тази работа беше изследвана възможността за използване на вече описаната техника за синхронизация на модовете на основата на формиране на разсейвателна, $\chi^{(2)}$ -леща в нелинейният кристал за ГВХ. Още първите експериментални резултати получени с конвенционален, двулъчепречупващ, 7-mm дълъг, бисмутов триборат (BiBO) нелинеен кристал, с апертура от $3 \times 3 \text{ mm}^2$ изрязан под $\theta=9^\circ$ и $\varphi=0^\circ$ в равнината x-z за първи тип оо-е ГВХ, показаха отличните възможности на предложеният метод. Този нелинеен кристал беше избран главно, защото той осигурява голяма ефективна нелинейност, в диапазона около 1.3 μm , но също така е много подходящ и за ефективна генерация на втора хармонична в диапазона около 2 μm , където излъчват Tm и Ho дотирани лазерни среди. Диапазон, към който са насочени бъдещите планове за работа по темата.

Експерименталната постановка е подобна на използваната в лазера на 1 μm . Активният елемент е 9 mm дълъг, клиновиден Nd:YVO₄ лазерен кристал с концентрация на активни йони от 0.25 at. %.

Условието за фазов синхронизъм, в случая се контролира посредством промяна на ъгъла на нелинейният кристал. Максимална ефективност и изходна мощност се получават с изходно огледало с 10 % пропускане за основното лъчение и високо отражение за втората хармонична. Изходната мощност в режим на синхронизация на

модовите достига 1.3 W получена при напмпване от 12.5 W. Измерената продължителност на генерираните импулси в този случай е 5.3 ps.

Най-късите лазерни импулси, от друга страна, се получават с изходното огледало с 5% пропускане за основното лъчение и високо отражение за втората хармонична, където вътрешно-резонаторната мощност е значително по-висока. На фиг. 6(a) е показана зависимостта на изходната мощност от напмпването при 5 % изходно огледало. Прагът на генерация е 2.7 W, а режимът на синхронизация на модовете се получава в диапазона (маркиран с червен овал на фиг. 6(a)) от 12 до 13.2 W напмпваща мощност. Максималната изходна мощност (0.9 W) в този случай е с около 30 % по-ниска от колкото при изходно огледало с пропускане от 10 %. По-висока изходна мощност (1.2 W) в непрекъснат режим беше получена и с това изходно огледало чрез увеличаване на напмпването до 17 W, но втори диапазон със стабилен режим на синхронизация на модовете не беше наблюдаван, главно поради многомодовият характер на лъчението в този диапазон.



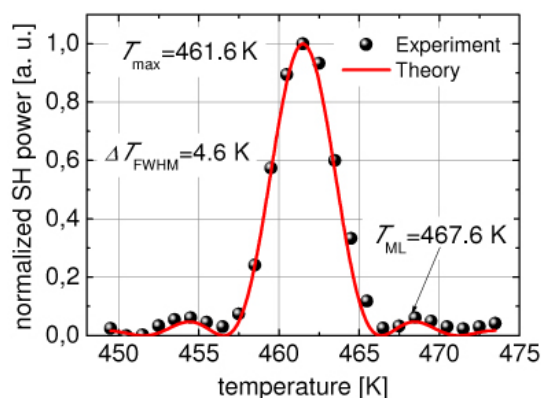
Фиг. 6 (a) Зависимост на изходната мощност от напмпването в Nd:YVO4 лазер с изходно огледало с 5% пропускане за лазерната дължина на вълната 7 mm VBO нелинеен кристал. Областите на стабилен режим на синхронизация на модовете са маркирани с овали. (b) Измерена автокорелационна функция

Ширината на половин височина на измерената автокорелационна функция (фиг.6 (b)) е 5.7 ps, от която след деконволюция, приемайки sech2 форма на генерираният импулс, получаваме 3.7 ps, за реалната продължителност на импулса.

Така, още с тези предварителни резултати бяха постигнати изходни мощности съизмерими с най-добрите цитирани в литературата [12], и импулси с продължителност по-малка от най-добрите постижения до момента [11], като за първи път са получени едновременно висока средна мощност и къси лазерни импулси в този спектрален диапазон.

Резултатите получени в диапазона около 1 μm показаха, че системата работи по-надеждно и устойчиво когато се използват периодично поляризирани структури за ГВХ. Поради тази причина, в последствие подобни експерименти бяха проведени и с периодично поляризиран MgSLT нелинеен кристал с дебелина 1 mm по оста Z, ширина от 5 mm по оста Y, и две различни дължини 10 mm и 20 mm, по оста X.

На фиг.7 е показана експериментално измерената (черните точки) зависимост на интензитета на втората хармонична от температурата (условието за фазов синхронизъм), заедно с теоретично пресметнатата крива (червената крива), използвайки съществуващите уравнения на Sellmeier за SLT [13]. Тя има максимум около $T_{\text{max}} = 461.6 \pm 0.5$ K и ширина на половин височина от $\Delta T = 4.6$ K. Стабилен режим на синхронизация на модовете отново се получава при по-висока температура, по конкретно при $T_{\text{ML}} = 467.6 \pm 1$ K.



Фиг. 7. Интензитета на втората хармонична, нормиран към единица, като функция на температурата на нелинейния кристал (T), измерена в непрекъснат режим с дългия 10 mm нелинеен кристал и изходно огледало с 5% пропускане. Подобна зависимост се наблюдава при всички изходни огледала.

Най-висока ефективност и изходна мощност в непрекъснат режим е получена със изходно огледа с 10% пропускане за основното лъчение и 100% отражение за втората хармонична. Прагът на генерация е около 3.7 W, докато режим на синхронизация на модовете се получава в диапазона от напompващи мощности между 15.4 and 16.6 W, където отново изходната мощност намалява с увеличаване на напompването. Максималната изходна мощност в режим на синхронизация на модовете достига 1.05 W, получена при 15.4 W напompваща мощност.

Измерената автокорелационна функция отговаря на продължителност на импулса на половин височина от 6.9 ps. Малко по-къси импулси (5.9 ps), бяха получени чрез намаляване на пропускането на изходното огледало до 5%, което съответно води до намаляване на изходната мощност в режим на синхронизация на модовете с 30%.

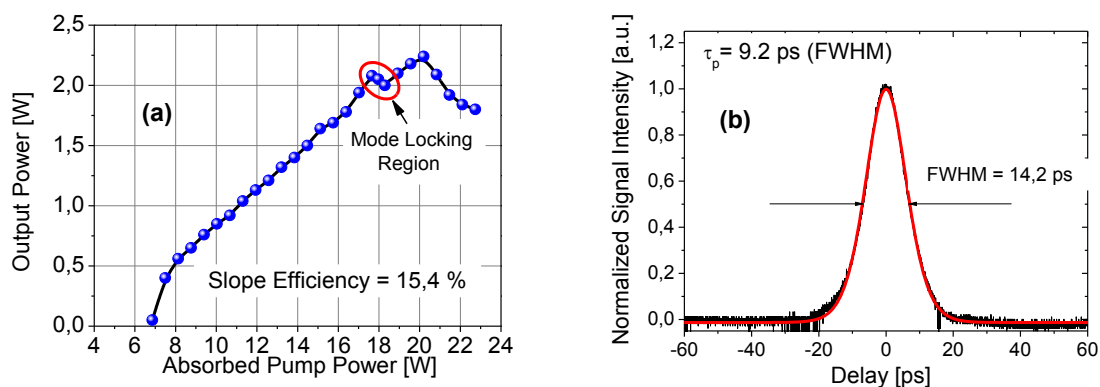
Симулация на лазерния резонатор показва, че размерът на мода в активният елемент се променя драстично с увеличаване на оптичната сила на топлинната леща, ефект, за който вече беше споменато в предишната глава. При ниска напompваща мощност, оптичната сила на топлинната леща е сравнително малка (фокусното разстояние е голямо от порядъка на 1m) и тя почти не влияе на размера на резонаторния мод. С увеличаване на напompването, оптичната сила на топлинната леща расте и размерът на мода в активния елемент монотонно намалява. При достигане на стойност от $\sim 4D_{pt}$ (конкретните стойности са за описания резонатор), размерът на мода в активния елемент е достигнал минималната си стойност и след това започва много бързо да расте. В тази област, ефективността на генерация силно намалява в следствие на неоптималното припокриване на резонаторния мод с напompването и тя отговаря на региона с обратен наклон, където получаваме стабилен режим на синхронизация на модовете. От друга страна, отрицателната $\chi^{(2)}$ -леща, която се формира в нелинейния кристал, в нашия конкретен резонатор, противодейства на ефекта на топлинната леща като се стреми да подобри припокриването и следователно да увеличи изходната мощност. Този прост механизъм, който води до бърза модулация на интегралното усилване в резонатора всъщност стой зад получаването на стабилен, стационарен режим на синхронизация на модовете в нашия конкретен резонатор.

Сами по себе си описаните по горе резултати с периодически поляризиран MgSLT нелинеен кристал, са много обещаващи, сравними с данните от литературата и дори по-добри, но опитът, който вече беше натрупан в диапазона около 1 μm , както и предварителните резултати с конвенционален двулъчепречупващ BIBO нелинеен кристал показва, че би трябвало да е възможно получаване на дори по-къси лазерни импулси с продължителност от порядъка на 3 - 4 ps. Една от възможните причини за генериране на толкова дълги импулси (~ 7 ps) е недостатъчната нелинейност или

вътрешно-резонаторна мощност. Най-лесният начин за проверка беше като се използва нелинеен кристал с по-голяма нелинейност или просто с по-голяма дължина. Избрах втория вариант, използвайки периодически поляризиран MgSLT нелинеен кристал с дължина 20 mm и изходното огледало с $T=10\%$, използвано в предходните експерименти.

Поведението на лазера е подобно на това с по-късият НЛК, като максималната изходна мощност в режим на синхронизация на модовете достига 0.8 W (от същия порядък като с късия нелинеен кристал), при продължителност на импулсите от 3.6 ps. Тук трябва да отбележим, че това са най-късите лазерни импулси генерирани някога от Nd дотирана среда излъчваща на този преход около 1342 nm, чрез която и да е техника за синхронизация на модовете.

От друга страна сравнение между резултатите получени в спектралния диапазон около 1.064 μm , с тези около 1342 nm, показва огромна разлика в максималната изходна мощност получена в двата случая. В диапазона около 1.064 μm максималната изходна мощност достига повече от 5 W, докато тази около 1.342 μm е в пъти по-малка (около 1 W, максимум 1.3 W в случая с VIBO нелинеен кристал). Основна причина за това е много по-голямата термична леща, която възниква при работа в спектралния диапазон около 1342 nm. Тя се дължи главно на увеличения квантов дефект, който води до значително нагряване на кристала. С цел минимизиране на този ефект бяха проведени експерименти с възбуждащ източник, излъчващ близо до втория максимум на поглъщане на Nd, около 880 nm, при което частиците се възбуждат директно в горното лазерно състояние. Това намалява квантовия дефект с $\sim 14\%$, като в същото време поглъщането остава достатъчно за получаване на ефективна лазерна генерация.



Фиг. 8. (a) Зависимост на изходната мощност на Nd:GdVO₄ лазера от напмпващата, при изходно огледало с пропускане $T=10\%$ и 10 mm дълъг периодически поляризиран MgSLT нелинеен кристал. Областта със стабилен режим на синхронизация на модовете е маркирана с овал. (b) Автокоределационна функция при максимална изходна мощност в режим на синхронизация на модовете.

На фиг. 8 (a) е показана зависимостта на средната изходна мощност от погълнатата напмпваща мощност, използвайки изходното огледало с пропускане $T=10\%$. Прагът на генерация е малко по-висок от колкото при напмпване с 808 nm (6.6 W), но намаленото количество отделена топлина дължащо се на намаления квантовият дефект позволява да се получи по-висока ефективност (15.4 %) и областта на стабилен режим на синхронизация на модовете да се премести към по-високи напмпващи респективно изходни мощности.

Режим на синхронизация на модовете (маркиран с овал на фиг. 8 (a)) отново се получава в участъка където изходната мощност започва да намалява с увеличаване на напмпването (диапазона между 17.6 и 18.3 W погълната мощност). Максималната изходна мощност достига 2.1 W, което е почти два пъти по-висока изходна мощност от колкото тази получена при стандартно напмпване около 808 nm и сравнима с най-

добрите постижения, в смисъл на максимална изходна мощност, показани наскоро, също използвайки напompване директно в ивицата на усилване, в Nd:YVO₄ лазер работещ в режим на синхронизация на модовете, с полупроводников насищаем абсорбер [14]. Измерената автокорелационна функция е показана на фиг. 8 (b). Ширината на половин височина е 14.2 ps, от където, след деконволюция, приемайки Sech^2 форма на генерираните импулси, получаваме 9.2 ps продължителност.

Тук трябва да се отбележи, че в тази конфигурация дълговременната стабилност на лазера не е особено добра. Режимът на синхронизация на модовете е самостартиращ, но много чувствителен към всякакви външни пертурбации и смущения. Това се дължи главно на неоптимизираното поглъщане в активния елемент ($\sim 70\%$), което в комбинация със силното фокусиране води до „вкарване“ на значителна част от напompващата мощност в обем по-голям от нулевият гаусов мод TEM₀₀ на резонатора. Понякога тази енергия е достатъчна да възбуди и по-висши модове, което в общият случай е пагубно за режима на синхронизация на модовете. Поради същата причина оптимизирането на системата в режим на синхронизация на модовете беше трудна задача, което е причина за сравнително голямата продължителност на генерираните импулси (9 ps).

След като погълнатата напompваща мощност е само $\sim 70\%$, от попадащата върху кристала, повишаване на изходната мощност на системата може да се очаква само чрез оптимизиране на поглъщането в активния елемент чрез повишаване на концентрацията. Също така допълнително скъсяване на импулсите до около 4 ps, може да се очаква в този случай.

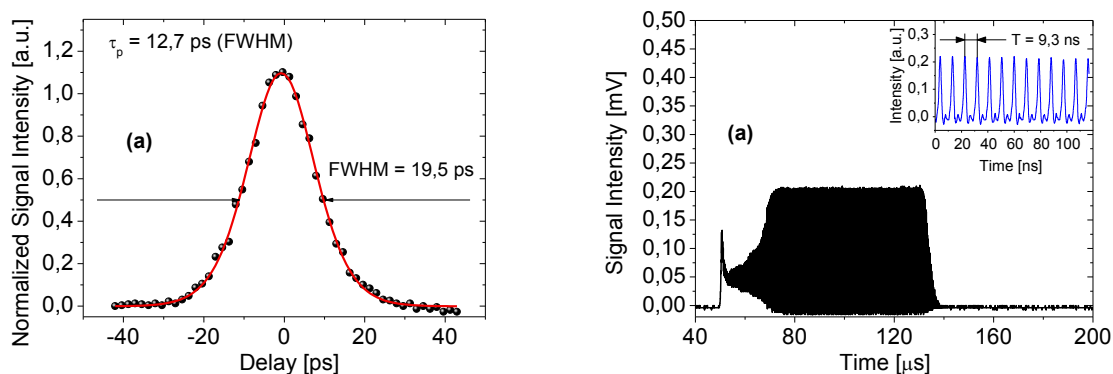
Разработване на лазерна система с пасивна синхронизация на модовете генерираща серия от пикосекундни импулси при импулсно напompване, с цел повишаване на енергията в единичен импулс.

Описаните до тук резултати са съсредоточени само върху системи с непрекъснато напompване, при които честотата на следване на импулсите се определя от времето за един двоен пробег на импулса в резонатора и обикновено е от порядъка 100MHz. При тази ситуация, енергията в единичен импулс е от порядъка на nJ (нано-джаули). Твърде скромна стойност за приложения, където е необходима голяма енергия в единичен импулс. С цел увеличаване енергията в импулса, разработената техника за синхронизация на модовете беше приложена в Nd:YVO₄ лазер с надлъжно, импулсно възбуждане, което позволява за кратко време в средата да се вкара енергия, която многократно надвишава прага на генерация. Това води до генериране на импулси чиято енергия е много по-висока и допълнително намалява вредните термични ефекти в активния елемент. Основен недостатък на импулсното възбуждане е, че формирането на лъчението в резонатора има случаен характер [15]. Като резултат се наблюдават съществени времеви изменения в параметрите на генерираните импулси (енергия и продължителност) и поява на смесен режим на Q-модулация и синхронизация на модовете.

Въвеждането на инерционна, отрицателна обратна връзка (ООВ) в лазерния резонатор, може да спомогне за установяването на квазистационарен режим на генерация и силно намаляване на флуктуациите в параметрите на изходните импулси. Чрез ООВ динамично се управляват загубите по време на развитие на генерацията, при което се потиска ефекта на Q-модулация.

Отрицателната обратна връзка в случая е реализирана чрез клетка на Покелс, в комбинация с поляризатор, като вътрешно резонаторни елементи на обратната връзка. Закъснителна линия, в края на която е поставен високоволтов, бърз фотодиод свързана директно към клетката на Покелс.

На фиг.9 (а) е показана измерената авторкорелационна функция. Продължителността на измерените импулси е 12.7 ps. Амплитудата на импулсите след първите 15 микросекунди остава постоянна в рамките на $\pm 0.5\%$ (фиг. 9(b)), което показва установяването на квазистационарен режим на генерация. Средната изходна мощност е 0.4 W при честота на повторение от 400Hz. Честотата на повторение на пикосекундните импулси, определена от времето за един двоен проход е 108 MHz, докато енергия в единичен пикосекунден импулс от порядъка на 150 nJ, на порядък по-висока енергия от типичните стойности за лазерите с непрекъснато възбуждане (1-10 nJ).



Фиг. 9. (а) Авторкорелационна функция. (b) Осцилограма на последователността от импулси и такава на единичните импулси (вмъкната картинка).

Изследване на алтернативен метод за пасивна синхронизация на модовете в близкия ИЧ-диапазон посредством насищане на поглъщането във филм от въглеродни нанотръбички в Nd:YVO₄ лазер излъчващ на 1.3 μ m

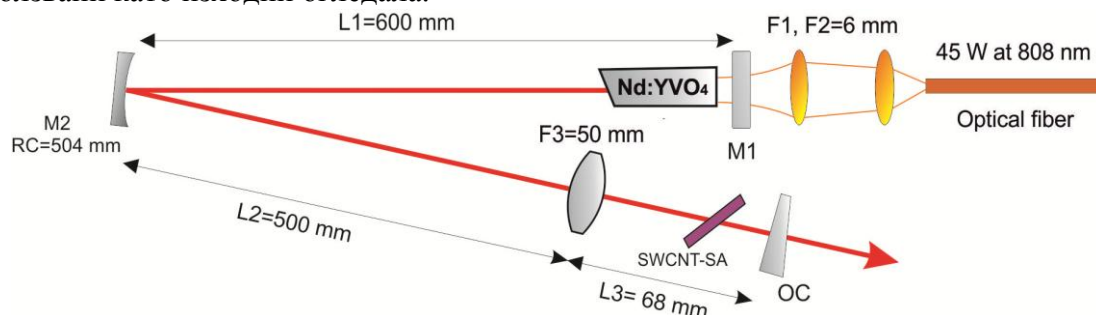
Както вече стана дума, спектралният диапазон около 1342 nm, където е вторият по интензивност излъчвателен преход на Nd³⁺ йони, е проблематичен за полупроводниковите насищаеми абсорбери. В последните години, обаче се появи нов тип пасивен модулатор на основата на насищане на поглъщането във филм от въглеродни нанотръбички (Singly Walled Carbon Nanotubes Saturable Absorber - SWCNT-SA).

В тази точка са описани експерименталните резултати от изследването на този алтернативен насищаем абсорбер, като за първи път той е използван за получаване на стационарен режим на синхронизация на модовете в Nd³⁺, дотирана лазерна среда работещи на $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ прехода около 1.3 μ m. Лазерният осцилатор на основата на Nd:YVO₄ лазерен кристал е оптимизиран за работа с TEM₀₀ с голям обем с цел постигане на максимална изходна мощност.

Насищаемите абсорбери на основата на въглеродни нанотръбички, имат широк спектър на поглъщане, изискват относително прост процес на производство (в сравнение с полупроводниковите насищаеми абсорбери) и спектъра на поглъщане може лесно да се контролира чрез параметрите на нанотръбичките. Основен недостатък, който трябва да се изтъкне са сравнително големите ненаситени загуби. Поради тази причина, първоначалните експерименти със синхронизация на модовете, са проведени с влакнести лазери, които не са толкова чувствителни към големи вътрешно-резонаторни загуби. В последно време, беше показано че този тип абсорбери могат да бъдат универсални устройства за получаване на режим на синхронизация на модовете и в твърдотелни лазери в целият спектрален диапазон между 1-2 μ m [16].

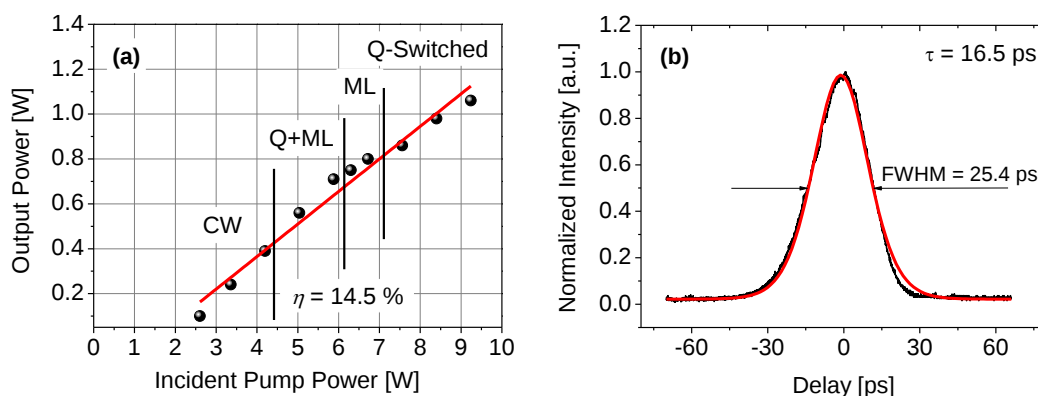
Използваният лазерен резонатор е показан на Фиг. 10. Активният елемент (АЕ) е клинообразен, Nd:YVO₄ лазерен кристал с дължина 9 mm и концентрация от 0.3 at. %.

Погълнатата мощност е около 92 %, от попадащата върху лазерният кристал, оптимизирана посредством промяна в температурата на напмпващият диод. Две плоски огледала с пропускане за лазерната дължина на вълната 5 % и 10 % бяха използвани като изходни огледала.



Фиг. 10. АЕ - Nd:YVO₄ активен елемент, M1 и M2 - огледала отразяващи 1342 nm, ОС - изходно огледало, SWCNT SA – насищаем абсорбер.

Най-висока изходна мощност (0.8 W) в стационарен режим на синхронизация на модовете се получава с огледалото имащо 10 % пропускане за лазерното лъчение (фиг. 11 (a)), при честота на повторение 127 MHz и 6.3 nJ в отделен пикосекунден импулс. Продължителността на измерените импулси е 16.5 ps (фиг. 11 (b)).



Фиг. 11. (a) Зависимост на изходната мощност на Nd:YVO₄ лазера от напмпващата, при изходно огледало с пропускане T=10%. (b) Автокорелационна функция при максимална изходна мощност в режим на синхронизация на модовете.

С двете изходни огледала лазерът има подобно поведение. Над прага работи първо в непрекъснат режим, без наличие на амплитудни модуляции, след това преминава през смесен режим на Q-модулация със синхронизация на модовете (Q+ML) и след като достигне, така наречения втори праг, лазерът преминава в стационарен режим на синхронизация на модовете. По нататъшно увеличаване на напмпващата мощност води до поява на силна Q-модулация и често до локална повреда на абсорбера.

Синхронизация на модовете в лазери с нови активни среди подходящи за диодно възбуждане, като Nd:LuVO₄, прилагайки разработената техника за пасивна синхронизация на модовете посредством $\chi^{(2)}$ -леща.

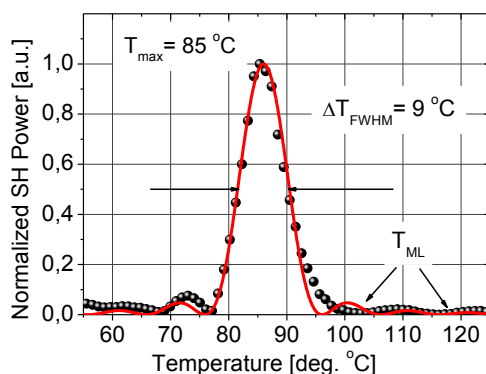
През изминалото десетилетие ортованадатните кристали TVO₄ (T=Y, Gd, Lu) станаха едни от най-важните матрици дотирани с Nd³⁺ йони. Голямото сечение за поглъщане, както и това за стимулирано излъчване в комбинация с добрата топлопроводимост, правят тези материали много привлекателни за изграждане на високо-ефективни, диодно напмпвани лазерни системи. Третият, най-нов, представител, Nd:LuVO₄, според литературата притежава по-големи сечения за

поглъщане и стимулирано излъчване, от тези на Nd:YVO₄ и Nd:GdVO₄, и също така по-широк флуоресцентен спектър (1.5 nm) [17,18].

Също така, отношението между сеченията за поглъщане σ_{abs} между 880 nm и 808 nm за Nd:LuVO₄ е ~ 0.75 [19, 20], по-голяма от това в Nd:YAG (~ 0.12), Nd: GdVO₄ (~ 0.5) и дори в Nd:YVO₄ (~ 0.7) [20], което прави този кристал много подходящ кандидат за напompване директно в ивицата на усилване.

В тази работа беше изследван режимът на синхронизация на модовете в Nd:LuVO₄ лазер чрез напompване директно в ивицата на усилване, използвайки лазерни диоди с централна дължина на вълната около 880 nm. За сравнение същите експерименти са проведени и в стандартна схема на възбуждане с диоди излъчващи около 808 nm.

Като основен механизъм за получаване на стационарен режим на синхронизация на модовете използваме формирането на $\chi^{(2)}$ -леща в периодично поляризиран КТР нелинеен кристал. Използвайки стандартна схема на напompване с 808 nm лазерен диод и 5 mm дълъг и 1mm дебел РРКТР нелинеен кристал (същият използван в т. 4.1 от настоящата работа), работещ далеч от условието за точен фазов синхронизъм ($\Delta K L \sim 5.6 \text{ rad.}$) в резонатор с 30 % изходно огледало, беше получена средна изходна мощност от 2.7 W и минимална продължителност на генерираните импулси от 7 ps. Заменяйки само напompващия източник с такъв излъчващ $\sim 880 \text{ nm}$, използвайки предимствата на схемата за възбуждане на частици директно в горното лазерно състояние, позволи изходната мощност да бъде увеличена с повече от 70 % до 4.6 W. Измерената продължителност на импулсите в този случай беше 7.5 ps. И с двата напompващи източника, генериране на много по-къси импулси ($\sim 3 \text{ ps}$) беше възможно само с намаляване на пропускането на изходното огледало до $T=5\%$, което разбира се води и до по-ниска изходна мощност ($\sim 0.8 \text{ W}$).

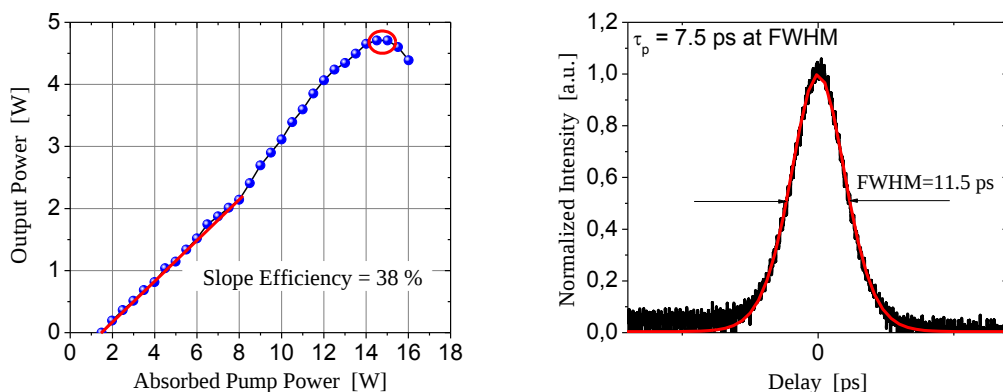


Фиг. 12. Интензитета на втората хармонична, нормиран към единица, като функция на температурата на нелинейния кристал (T), измерена в непрекъснат режим с изходно огледало с 5% пропускане и 808 nm напompване. Подобна зависимост се наблюдава при всички изходни огледала.

Със същото изходно огледало ($T=5\%$ за лазерната дължина на вълната), отивайки още по далеч от точен фазов синхронизъм, до $\Delta K L \sim 10 \text{ rad.}$ (или $117 \text{ }^{\circ}\text{C}$ температура на държача на нелинейния кристал), бяха получени импулси с ~ 2 пъти по-малка продължителност (1.6 ps), при максимална изходната мощност от 0.7 W. Постигание, което е своеобразен рекорд за най-кратки импулси генерирани някога, от която и да е тесноивична лазерна среда дотирана с Nd⁺³ йони. За сравнение, най-кратката продължителност на импулсите датира от повече от 20 години, през далечната 1990г. J. Goodberlet et. al. демонстрират Nd:YAG лазер в режим на синхронизация на модовете, посредством техниката чрез сумиране на импулси (additive pulse mode locking), получават 1.7 ps, при изходна мощност от 25 mW [21].

На фиг. 12 е показана експериментално измерената (черните точки) зависимост на интензитета на втората хармонична от температурата (условието за фазов синхронизъм), заедно с теоретично пресметнатата крива (червената крива), използвайки съществуващите уравнения на Sellmeier за KTP [22]. Тя има максимум при 85°C (температура на държача на нелинейният кристал) и ширина на половин височина от ~9 °C (фиг. 12).

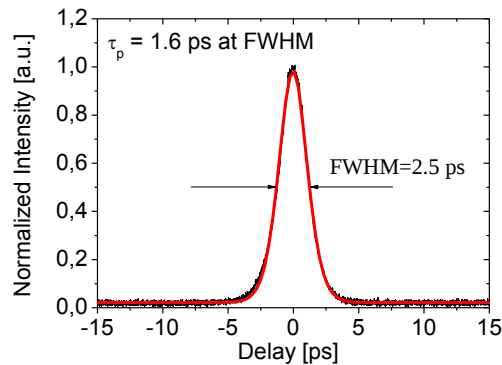
Използвайки 808 nm напмпващ източник и изходно огледало с пропускане $T=30\%$, беше получена максимална изходна мощност в стационарен режим на синхронизация на модовете от 2.7 W и ефективност 29 %, като продължителността на измерените импулси в този случай е 7 ps.



Фиг. 13 а) Зависимост на изходната мощност на Nd:LuVO₄ лазерът от напмпващата, при изходно огледало с пропускане $T=30\%$ и напмпващ източник с дължина на вълната около 880 nm. Областта със стабилен режим на синхронизация на модовете е маркирана с овал (б) Автокорелационна функция при максимална изходна мощност в режим на синхронизация на модовете

Ефективността на лазерният осцилатор със същото изходно огледало, но напмпващ източник с дължина на вълната около 880 nm, е показана на Фиг. 13 (а). Минимизирането на топлинните ефекти посредством намаляване на квантовият дефект позволява ефективността да се увеличи до 38 % и стабилният режим на синхронизация на модовете да се премести към по-високи напмпваща и съответно изходна мощност. Максималната изходна мощност в режим на синхронизация на модовете достига 4.6 W, повече от 70 % по-висока от колкото в случая на стандартно възбуждане с лазерни диоди излъчващи около 808 nm. Продължителността на измерените импулси (Фиг. 13(б)) е 7.5 ps. И в двата случая (напмпване с 808 nm или 880 nm) значително скъсяване на генерираните импулси, до ~3 ps, се получава чрез намаляване на пропускането на изходното огледало до $T=5\%$. Намаляването на пропускането на изходното огледало, разбира се води и до намаляване на изходната мощност до ~1 W

Резултатите показани д тук съответстват на разстройва от фазов синхронизъм от ~5.6 rad., тоест 103 °C, температура на периодично поляризираният KTP нелинейният кристал. Отивайки още по-далеч от максимумът на кривата показана на Фиг. 12 до 117 °C (~10 rad.), и използвайки изходно огледало с $T=5\%$ за основното лъчение и високо отражение за втората хармонична, бяха получени импулси с продължителност от 1.6 ps (виж фиг. 14)

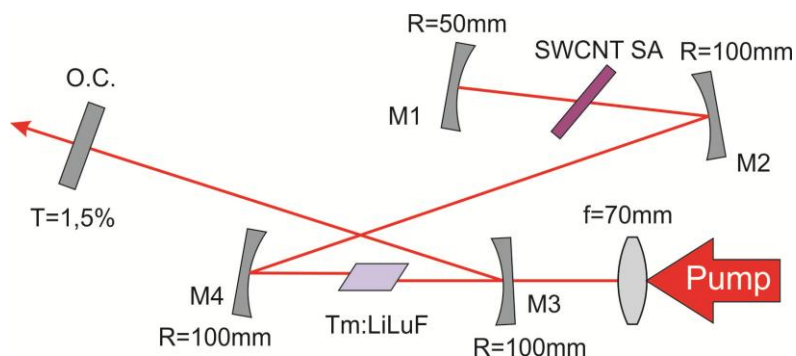


Фиг. 14. Автокорелационна функция при минимална продължителност на импулса получена с изходно огледало с пропускане $T=5\%$ и напompващ източник с централата дължина на вълната около 880 nm

Синхронизация на модовете в Tm дотирани лазери излъчващи в спектралният диапазон около $2\text{ }\mu\text{m}$

Спектралният диапазон около $2\text{ }\mu\text{m}$, където излъчват Tm дотираните среди е следващата цел, върху която се работи и в момента. Първите предварителни резултати бяха получени чрез насищаем абсорбер на основата на въглеродни нанотръбички, подобен на този използван в т.4.4 от настоящата работа.

Експерименталната постановка, показана на фиг. 15, представлява X образен резонатор и сгъване за формиране на шийка в мястото на насищаемия абсорбер. Лазерният кристал е изрязан под ъгъл на Брюстер и монтиран в меден държач. Температурата му е стабилизирана на $15\text{ }^\circ\text{C}$, посредством прецизен контрол на водата циркулираща през него. Бяха използвани два типа лазерни кристали. Единият е дотиран с $3\text{ at. \%}$, Tm активни йони, Tm:KLuW , с размери $2.9 \times 3 \times 3\text{ mm}^3$, а вторият е Tm:LiLuF дотиран с $8\text{ atm. \%}$ активни йони и с размери $3.2 \times 3.17 \times 2\text{ mm}^3$. И двата кристала се напompват посредством, непрекъснат $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ лазер, осигуряващ пренастройваемо лъчение и максимална изходна мощност до 2 W .



Фиг. 15. Схема на използвания лазерен резонатор. f – фокусираща леща просветлена за напompването; M1, M2, M3, M4 сферични, фокусиращи огледала; OC плоско изходно огледало с $T=1.5\text{ \%}$.

С първият кристал, Tm:KLuW и изходно огледало с пропускане $1.5\text{ \%}$ при централна дължина на вълната 1944 nm , беше възможно получаване на стационарен режим на синхронизация на модовете само чрез оптимизиране на положението на абсорбера около шийката. Максималната изходна мощност в режима на синхронизация на модовете беше около 220 mW , докато продължителността на измерените импулси е около 16 ps .

С вторият кристал, Tm:LiLuF , който има време на живот на горното лазерно състояние от 12.2 ms (благоприятстващ появата на Q-модулация), стационарен режим

на синхронизация на модовете не беше възможен. Беше получен само смесен режим на Q-модулация и синхронизация на модовете. Въпреки това, при определени условия беше възможно да характеризираме генерираните лазерни импулси. Използвайки отново изходно огледало с пропускане 1.5 %, изходната мощност в случая е ~190 mW, при централна дължина на вълната от 1942 nm. Честотата на повторение на нискочестотните Q-импулси е около 25 KHz, като всеки импулс е модулиран с честота от ~128 MHz, определена от дължината на резонатора. Макар и в нестационарен режим на работа, измерената средна продължителност на импулсите е 12.6 ps.

Литература към:

1.1 Актуалност на темата

1. T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in Ruby" *Nature.*, **187**,494, (1960).
2. Jeff Hecht, "Short history of laser development" *Optical Engineering*, **49**, (2010).
3. P. F. Moulton, "Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃", *J Opt. Soc. Am. B*, **3**,1 25–132, (1986).
4. Rudiger Paschotta and Ursula Keller, "Ultrafast Solid-State Lasers", (In "Ultrafast lasers – technology and applications", New York, 2003).
5. D. E. Spence, P.N. Kean, W. Sibbett, "60-fsec pulse generation from a self-mode locked Ti:sapphire laser" *Opt. Lett.*, **16**, 42–44 (1991).
6. U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd, T. H. Chiu, J. F. Ferguson, and M. T. Asom, "Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber" *Opt. Lett.*, **17**, 505–507 (1992).

2.1 Диодно напompвани лазери с висока средна мощност

1. J. Aus der Au, G. J. Spühler, T. Südmeyer, R. Paschotta, R. Hövel, M. Moser, S. Erhard, M. Karszewski, A. Giesen, and U. Keller, "16.2-W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser," *Opt. Lett.*, **25**, 859–861 (2000).
2. E. Innerhofer, T. Südmeyer, F. Brunner, R. Paschotta, and U. Keller, "Mode-locked high-power lasers and nonlinear optics – a powerful combination" *Laser Phys. Lett.* **1**, 82 (2004).
3. Cyrill Roman Emmanuel Baer, Christian Kränkel, Clara Jody Saraceno, Oliver Hubert Heckl, Matthias Golling, Rigo Peters, Klaus Petermann, Thomas Südmeyer, Günter Huber, and Ursula Keller, "Femtosecond thin-disk laser with 141 W of average power", *Optics Letters*, **35**, (2010).
4. Dominik Bauer, Ivo Zawischa, Dirk H. Sutter, Alexander Killi, and Thomas Dekorsy, "Mode-locked Yb:YAG thin-disk oscillator with 41 µJ pulse energy at 145 W average infrared power and high power frequency conversion", *Optics Express*, **20**, (2012).
5. G. J. Spuhler, R. Paschotta, and U. Keller, M. Moser, M. J. P. Dymott, D. Kopf, J. Meyer, K. J. Weingarten, J. D. Kmetec, J. Alexander, and G. Truong "Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser with 10-W average power in a diffraction-limited beam", *Optics Letters*, **24**, (1999).
6. G.M. Thomas · T. Omatsu · M.J. Damzen, "High-power neodymium-doped mixed vanadate bouncer geometry laser, mode locked with nonlinear mirror", *App. Phys. B*, (2012).
7. Louis McDonagh, Richard Wallenstein, Achim Nebel, "111W, 110 MHz repetition-rate, passively mode-locked TEM₀₀ Nd:YVO₄ master oscillator power amplifier pumped at 888 nm", *Optics Letters*, **32**, (2007).

2.2 Синхронизация на модовете

1. P. G. Kryukov and Vladilen Stepanovich Letokhov, "Fluctuation Mechanism of Ultrashort Pulse Generation by Laser With Saturable Absorber", IEEE Journal of Quantum Electronics, **8**, (1972).
2. P. N. Kean, X. Zhu, D.W. Crust, R. S. Grant, N. Landford, W. Sibbett, "Enhanced modelocking of color center lasers", Optics Letters, **14**, 39, (1989).
3. J. Goodberlet, J. Jacobson, and J. G. Fujimoto, Self-starting additive-pulse mode-locked diode-pumped Nd:YAG laser, Opt. Lett, **15**, 1990
4. K. A. Stankov, and J. Jethwa, "J., "A new mode-locking technique using a nonlinear mirror," Opt. Commun. **66**(1), 41–46 (1988).

2.3 Експериментални резултати

1. Y. F. Chen, S. W. Tsai, and S. C. Wang, "High-power diode-pumped nonlinear mirror mode-locked Nd:YVO₄ laser with periodically-poled KTP," Appl. Phys. B **72**, 395–397 (2001).
2. A. Agnesi, C. Pennacchio, G. C. Reali, and V. Kubecek, "High-power diode-pumped picosecond Nd(3+):YVO(4) laser," Opt. Lett. **22**(21), 1645–1647 (1997).
3. I. C. Buchvarov, and S. M. Saltiel, "Passive feedback control of actively mode-locked pulsed Nd:YAG laser," Proc. SPIE **1842**, 124–129 (1992).
4. I. C. Buchvarov, K. A. Stankov, and S. M. Saltiel, "Pulse shortening in an actively mode-locked laser with a frequency-doubling nonlinear mirror," Opt. Commun. **83**(3-4), 241–245 (1991).
5. I. Buchvarov, G. Christov, and S. Saltiel, "Transient behavior of frequency doubling mode-locker. Numerical analysis," Opt. Commun. **107**(3-4), 281–286 (1994).
6. S. J. Holmgren, V. Pasiskevicius, and F. Laurell, "Generation of 2.8 ps pulses by mode locking a Nd:GdVO₄ laser with defocusing cascaded Kerr lensing in periodically poled KTP," Opt. Express **13**(14), 5270–5278 (2005).
7. A. Agnesi, A. Guandalini, A. Tomaselli, E. Sani, A. Toncelli, and M. Tonelli, "Diode-pumped passively modelocked and passively stabilized Nd³⁺:BaY₂F₈ laser," Opt. Lett. **29**(14), 1638–1640 (2004).
8. Z. M. Liao, S. A. Payne, J. Dawson, A. Drobshoff, C. Ebberts, D. Pennington, and L. Taylor, "Thermally induced dephasing in periodically poled KTP frequency-doubling crystals," J. pt. Soc. Am. B **21**, 2191-2196 (2004).
9. N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, and K. Kitamura, "Stable high-power green light generation with thermally conductive periodically poled stoichiometric lithium tantalate," Jpn. J. Appl. Phys. **43**, L1265–L1267 (2004).
10. D. A. Armstrong, A. Robertson, N. Langford, and A. I. Ferguson, "1.3-μm diode-pumped Nd:YLF additive-pulse mode-locked laser," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, Vol. 15 of 1995 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D.C., 1995), pp. 344–345.
11. R. Fluck, G. Zhang, U. Keller, K. J. Weingarten, and M. Moser, "Diode-pumped passively mode-locked 1.3-μm Nd:YVO₄ and Nd:YLF lasers by use of semiconductor saturable absorbers," Opt. Lett. **21**(17), 1378–1380 (1996).

12. S. C. Huang, H. L. Cheng, Y.-F. Chen, K. W. Su, Y. F. Chen, and K. F. Huang, "Diode-pumped passively mode-locked 1342 nm Nd:YVO₄ laser with an AlGaInAs quantum-well saturable absorber," Opt. Lett. **34**(15), 2348–2350 (2009).
13. A. Bruner, D. Eger, M. B. Oron, P. Blau, M. Katz, and S. Ruschin, "Temperature-dependent Sellmeier equation for the refractive index of stoichiometric lithium tantalate," Opt. Lett. **28**(3), 194–196 (2003).
14. Fang-Qin Li, Ke Liu, Lin Han, Nan Zong, Yong Bo, Jing-Yuan Zhang, Qin-Jun Peng, Da-Fu Cui, and Zu-Yan Xu, "High-power 880 nm diode-directly-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser at 1342 nm with a semiconductor saturable absorber mirror", Opt. Lett. **36**, 1485-1487 (2011).
15. K. Komarov, A. Kuchyanov, V. Ugozhayev, "High-Performance Picosecond and Femtosecond Solid-State Lasers with Feedback-Controlled Passive Mode- Locking," in Advanced Laser Concepts and Applications, Proc. of SPIE 1501, 135 (1991).
16. W. B. Cho, J. H. Yim, S. Y. Choi, S. Lee, A. Schmidt, G. Steinmeyer, U. Griebner, V. Petrov, D.-I. Yeom, K. Kim, and F. Rotermund, Adv. Funct. Mater. **20**, 1937 (2010).
17. C. Maunier, J. L. Doualan, R. Moncorge, A. Speghini, M. Bettinelli, and E. Cavalli, "Growth, spectroscopic characterization, and laser performance of Nd:LuVO₄, a new infrared laser material that is suitable for diode pumping", J. Opt.Soc. Am. B **19**, 1794-1800 (2002).
18. S. Zhao, H. Zhang, J. Liu, J. Wang, X. Xu, Z. Zhao, J. Xu, and M. Jiang, "Growth of excellent quality Nd:LuVO₄ single crystal and laser properties," J. Cryst. Growth **279**, 146-153 (2005).
19. Takayo Ogawa, Yoshiharu Urata, Mikio Higuchi¹, Jun-ichi Takahashi¹, Ceelia Leong², Junko Morikawa², Toshimasa Hashimoto², and Satoshi Wada, " Optical and Thermal Characteristics of Nd:LuVO₄ Grown by Floating Zone Method ", Applied Physics Express, **2**, (2009).
20. Nicolaie Pavel, " In-band pumping of Nd-based solid-state lasers", Romanian Reports in Physics, **60**, 995-1012, (2008).
21. J. Goodberlet, J. Jacobson, and J. G. Fujimoto, Self-starting additive-pulse mode-locked diode-pumped Nd:YAG laser, Opt. Lett, **15**, 1990
22. Z. M. Liao, S. A. Payne, J. Dawson, A. Drobshoff, C. Ebberts, D. Pennington, and L. Taylor, "Thermally induced dephasing in periodically poled KTP frequency-doubling crystals," J. Opt. Soc. Am. B **21**, 2191-2196 (2004).

IV. Списък на публикации и доклади на научни конференции свързани с дисертацията

Публикации в международни рецензирани списания:

1. H. Iliev, D. Chuchumishev, I. Buchvarov, V. Petrov, "Passive mode-locking of a diode-pumped Nd:YVO₄ laser by intracavity SHG in PPKTP," Opt. Express **18**, 5754-5762 (2010)
2. H. Iliev, I. Buchvarov, S. Kurimura, V. Petrov, "High-power picosecond Nd:GdVO₄ laser mode locked by SHG in periodically poled stoichiometric lithium tantalate," Opt. Lett. **35**, 1016-1018 (2010)

2.1 [H. Iliev, I. Buchvarov, S. Kurimura, V. Petrov, "High-power picosecond Nd:GdVO₄ laser mode locked by SHG in periodically poled stoichiometric lithium tantalate," Opt. Lett. **35**, 1016-1018 \(2010\)](#) - избрана от американското физично общество (APS) и американският физичен институт (AIP) за повторно

публикуван в броят от месец Май 2010г. на виртуално списание в областта на науката и технологията в раздела за свръх бързи процеси (Virtual Journal in science and technologies, section - Ultrafast Science.)

3. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Sunao Kurimura, Valentin Petrov, "1.34- μm Nd:YVO₄ laser mode-locked by intracavity SHG in periodically-poled stoichiometric lithium tantalate", *Opt. Express* **19**, 21754-5759 (2011)
4. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Sun Young Choi, Kihong Kim, Fabian Rotermund, Uwe Griebner and Valentin Petrov, "Steady state mode-locking of a 1.34 μm Nd:YVO₄ laser using a single-walled carbon nanotube saturable absorber" *App. Phys. B*, DOI 10.1007/s00340-011-4836-1,(2011).

Публикации в пълен текст в издания на SPIE на международни научни конференции:

5. H. Iliev, D. Chuchumishev, I. Buchvarov, V. Petrov, "Diode-pumped passively mode-locked laser using SHG in periodically poled crystals" in *International Conference on Ultrafast and Nonlinear Optics 2009*, Proceedings of SPIE Vol. 7501 (SPIE, Bellingham, WA 2009) 750106
6. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Veselin Alexandrov, Sunao Kurimura, Valentin Petrov, " Steady state mode-locking of the Nd:YVO₄ laser operating on the 1.34 μm transition using intracavity SHG in BIBO or PPMgSLT " in *SPIE Photonics West*, Vol. 7912 (2011)
7. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Sun Young Choi, Kihong Kim, Fabian Rotermund,b) Valentin Petrov "1.34 μm Nd:YVO₄ laser mode-locked by a single-walled carbon nanotube saturable absorber" in *SPIE Photonics West*, Vol. 8235 (2012)

Публикации в пълен текст в други издания:

8. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, High power Nd: YVO₄ laser mode-locked by cascading second order nonlinearity, *Annuaire de l'Universite de Sofia "St. Kliment Ohridski"*, Faculte de Physique, v. 103, 2010

Доклади на научни конференции:

9. Hristo Iliev, Anton Trifonov, Ivan Bucvarov - Development of a passively mode-locked all solid-state diode-pumped Nd laser , *Meetings in Physics 2009*
10. H.Iliev , A. Stalnionis ,D. Draganov, I. Buchvarov, Mode-locking of electro-optically feedback controlled CW pumped Nd: YVO₄ laser, *International Conference on Ultrafast and Nonlinear Optics 2009*, paper UFL-P4
11. H.Iliev , I. Buchvarov, 1.3 μm Nd:YVO₄ laser, mode locked by second-harmonic generation in bismuth triborate (BiBO) nonlinear crystal, *Meetings in Physics 2010*;
12. Hristo Iliev, Danail Chuchumishev, Ivan Buchvarov, Sunao Kurimura, Valentin Petrov, Uwe Griebner, Passive mode-locking of a Nd:GdVO₄ laser by intracavity SHG in periodically-poled stoichiometric lithium tantalate, *OSA/ ASSP/LACSEA/LS&C 2010*, paper AWD5
13. Hristo Iliev, Danail Chuchumishev, Ivan Buchvarov, Sunao Kurimura, Uwe Griebner, and Valentin Petrov, Nd:GdVO₄ laser passively mode-locked by cascaded nonlinearity in periodically-poled lithium tantalite, *OSA / CLEO/QELS 2010*, paper CMNN3
14. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Sunao Kurimura, Valentin Petrov, 1.3- μm Nd:YVO₄ laser mode locked by cascaded χ (2) lens formation in periodically-poled stoichiometric lithium tantalate, poster presentation at 4th EPS-QEOD Europhoton Conference, paper TuP23
15. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Sunao Kurimura, Huaijin Zhang, Jiyang Wang, Junhai Liu, Valentin Petrov, Nd:LuVO₄ Laser Passively Mode-Locked by $\chi^{(2)}$ - Lens Formation in Periodically Poled Stoichiometric Lithium Tantalate, *OSA/ ASSP/LACSEA/LS&C 2011*, paper AWA14
16. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Sunao Kurimura, Valentin Petrov, 1.34- μm Nd:YVO₄ Laser Mode-Locking by Chi-2 Lensing in Periodically Poled Stoichiometric Lithium Tantalate, *OSA/ ASSP/LACSEA/LS&C 2011*, AWA16

17. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Valentin Petrov, Nd:YVO₄ Laser Mode-Locking at 1.34 μm by Negative $\chi^{(2)}$ - Lens Formation in an Intracavity BIBO Crystal, OSA / CLEO/QELS 2011, paper CMH2
18. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Valentin Petrov, Chi(2)-lens Mode Locking of a 1.34 μm Nd:GdVO₄ Laser In-band Pumped by a 880 nm Laser Diode, CLEO Europe-EQEC 2011, paper CA8.2
19. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Sergey Gagarsky, A. Stalnionis, Steady-state Operation of Pulsed Pumped Self Mode Locked Nd:YVO₄ Laser using Electro-optical Feedback Control, CLEO Europe-EQEC 2011, paper CA.P.14
20. Hristo Iliev and Ivan Buchvarov, $\chi(2)$ -Lens Mode Locking of Nd:YVO₄ Laser Operating at 1.34 μm , FiO/LS 2011, paper FTuK2
21. Hristo Iliev, Valentin petrov and Ivan Buchvarov, Steady-state Mode Locking of a Nd YVO₄ operating on the 1. 34 μm transition, ALT, 2011, paper P-4-UF
22. Hristo Iliev, Ivan Buchvarov, Sun Young Choib, Kihong Kim, Fabian Rotermund and Valentin Petrov, 1.34 μm Nd:YVO₄ laser mode-locked by a single-walled carbon nanotube saturable absorber, SPIE Photonics WEST 2012, paper 8235-12
23. Hristo Iliev; Veselin Aleksandrov ; Ivan C. Buchvarov; Zhang Huaijin; Jiyang Wang; Junhai Liu; Valentin Petro, In-band Pumped Nd:LuVO₄ Laser Mode-locked by Negative $\chi(2)$ -lens Formation in an Intracavity LBO Crystal, OSA / CLEO/QELS 2012, paper CF3L.7
24. Hristo Iliev, Veselin Alexandrov, Ivan Buchvarov, Huaijin Zhang, Jiyang Wang, and Valentin Petrov, Generation of 1.6 ps by $\chi(2)$ -lens Mode Locking of an In-band Pumped Nd:LuVO₄ Laser, poster presentation at 5th EPS-QEOD Europhoton Conference, paper ThP.

V. Забелязани независими цитирания на статиите по дисертацията:

10.1 I H. Iliev, I. Buchvarov, S. Kurimura, V. Petrov, "High-power picosecond Nd:GdVO₄ laser mode locked by SHG in periodically poled stoichiometric lithium tantalate," Opt. Lett. **35**, 1016-1018 (2010)

1. Christoph Schaefer, Christian Fries, Christian Theobald, Johannes A. L'huillier, "Parametric Kerr lens mode-locked, 888 nm pumped Nd:YVO₄ laser," Optics Letters, **36**, 2674-2676, (2011).
2. Y. H. Liu, Z. D. Xie, S. D. Pan, X. J. Lv, Y. Yuan, X. P. Hu, J. Lu, L. N. Zhao, C. D. Chen, G. Zhao, and S. N. Zhu, "Diode-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser at 1342 nm with periodically poled LiNbO₃," Optics Letters, **36**, 698-700 (2011).
3. Jean-Baptiste Dherbecourt, Adrien Denoeud, Jean-Michel Melkonian, Myriam Raybaut, Antoine Godard, Michel Lefebvre, and Emmanuel Rosencher, "Picosecond tunable mode locking of a Cr²⁺: ZnSe laser with a nonlinear mirror" Opt. Lett. **36**, 751-753 (2011).
4. G Dherbecourt Jean-Baptiste, Denoeud Adrien; Melkonian Jean-Michel, "High power modelocking of a stigmatic bounce geometry laser using a nonlinear mirror", App. Phys. B, **101**, (2010).
5. G.M. Thomas, S.P. Chard, M.J. Damzen, "High power modelocking of a stigmatic bounce geometry laser using a nonlinear mirror", App. Phys. B, **101**, 553-557 (2010).
6. G.M. Thomas, T. Omatsu, M.J. Damzen, "High-power neodymium-doped mixed vanadate bounce geometrylaser, mode locked with nonlinear mirror", App. Phys. B, (2012)

10.2 H. Iliev, D. Chuchumishev, I. Buchvarov, V. Petrov, "Passive mode-locking of a diode-pumped Nd:YVO₄ laser by intracavity SHG in PPKTP," Opt. Express **18**, 5754-5762 (2010)

1. G.M. Thomas, S.P. Chard, M.J. Damzen, "High power modelocking of a stigmatic bounce geometry laser using a nonlinear mirror", App. Phys. B, **101**, 553-557 (2010).