

## БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

---

Институт по физика на твърдото тяло „Академик Георги Наджаков“

Конкурс за финансиране по Национална научна програма „Петър Берон. Наука и иновации с Европа“ (Петър Берон и НИЕ) – 2023 г.

Основна научна област – **физически науки**

## ОБОБЩЕН НАУЧЕН ОТЧЕТ

Административен договор – № КП-06-ДБ/9 от 14.12.2023 г.

**Тема на проекта:** „Фемтосекундна лазерна модификация на различни материали“

**Базова организация:** Институт по физика на твърдото тяло „Академик Георги Наджаков“  
– Българска академия на науките

Ръководител на научния колектив:

/доц. д-р Екатерина Йорданова/

## Научен колектив

Научна степен, академична длъжност	Име	Месторабота	Млад учен	Подпис
Д-р, доц.	Екатерина Йорданова	ИФТТ-БАН		
Д-р, изследовател с научна степен	Виктория Атанасова	ИФТТ-БАН	постдокторант	

## Увод

Проектът „Фемтосекундна лазерна модификация на различни материали“ (FLAMAT) е насочен към актуална и бързо развиваща се област на фотониката – управляемата промяна на свойствата на оптични материали чрез свръхкъси лазерни импулси. Фемтосекундните лазери позволяват прецизно въздействие с минимален топлинен ефект, което ги прави особено подходящи за модифициране на тънкослойни покрития и стъклени подложки с цел подобряване на техните оптични характеристики.

**Актуалността** на проекта произтича от необходимостта от по-задълбочено експериментално изясняване на механизмите на взаимодействие между фемтосекундното лазерно лъчение и диелектричните материали. **Новостта** се състои в интегрирания подход – едновременно изследване на покрития и подложки чрез комбиниране на лазерна обработка с оптична, структурна и морфологична характеристика, включително анализ на нелинейните оптични свойства.

**Основната цел** на FLAMAT е да се получи експериментално обосновано знание за ефектите от фемтосекундната модификация върху тънкослойни оптични покрития и техните подложки и на тази основа да се формулират препоръки за подходящи режими на обработка с потенциал за бъдещи приложения във фотониката.

### I. Осъществени изследвания и дейности по работните пакети

Цялостното изпълнение на проекта е заложено в рамките на пет работни пакета (РП), с обща продължителност на проекта от 24 месеца. РП1 обхваща административното, финансовото и научното управление на проекта. РП2 и РП3 са посветени на научноизследователските задачи, свързани с фемтосекундната лазерна модификация на оптичните покрития и подложките, съответно, като подбор и подготовка на образци, изграждане и калибриране на експерименталната установка и експериментално определяне на оптимални работни параметри. РП 4 е посветен на аналитичната оценка на ефекта на лазерната модификация върху материалите посредством набор от микроскопски и спектроскопски методи. РП 5 обхваща изпълнението на цялостната стратегия за разпространение на резултатите и популяризиране на дейностите по проекта, спазвайки утвърдените принципи на отворена наука, FAIR управление на данните и коректна научна комуникация към различни целеви аудитории.

Двата етапа на проекта са осъществени в рамките на по 12 месеца всеки, общо 24 месеца, като разпределението на дейностите по работната програма в максимална степен следва предвидения график, представен в Таблица 1. При планирането и изпълнението на експерименталните изследвания утвърденият времеви план е бил използван като основна рамка и е бил съблюдаван, с необходимата гъвкавост, обусловена от спецификата на лабораторната работа. Всички планирани дейности са реализирани съгласно Работната програма и утвърдения финансов план на проекта..

Таблица 1. График за изпълнението проекта

Работен пакет	Заглавие	Година 1												Година 2											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
<b>WP1</b>	Управление на проекта																								
D1.1																									
D1.2																									
D1.3																									
D1.4																									
D1.5																									
<b>WP2</b>	Научна част 1																								
D2.1																									
D2.2																									
D2.3																									
M2.1																									
M2.2																									
<b>WP3</b>	Научна част 2																								
D3.1																									
D3.2																									
M3.1																									
M3.2																									
<b>WP4</b>	Аналитична оценка																								
D4.1																									
D4.2																									
D4.3																									
D4.4																									
M4.1																									
M4.2																									
<b>WP5</b>	Разпространение на резултатите																								
D5.1																									
D5.2																									
D5.3																									
D5.4																									
D5.5																									
D5.6																									
D5.7																									
D5.8																									
M5.1																									
M5.2																									

Легенда: D – deliverable; M – milestone

**Основните научни цели**, които бяха заложи в проекта са както следва:

**Цел 1:** Провеждане на задълбочени фундаментални изследвания на механизмите и ефектите на фемтосекундната лазерно-индуцирана повърхностна модификация върху физикохимичните свойства на тънкослойни оптични покрития от материали като  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  и др.

**Цел 2:** Изследване на фемтосекундната лазерна повърхностна модификация на материали, използвани като подложки за тънкослойни покрития (топен кварц, боросиликатни стъкла, BK7 и др.), с цел оценка на потенциала им за подобрена функционализация.

**Цел 3:** Характеризиране на линейните и нелинейните оптични свойства, химичната структура, морфологията и повърхностната топография на покритията и подложките преди и след лазерната модификация.

**Цел 4:** Проследяване влиянието на параметрите на лазерната обработка (дължина на вълната, продължителност на импулса, честота на повторение, плътност на потока на енергията и др.) върху степента и характера на настъпващите модификации в материалите.

Дейностите, заложи в утвърдената Работна програма, за изпълнение на поставените цели, са обобщени в следващата секция Работни пакети.

## Работни пакети

---

### Работен пакет 1: Управление на проекта

**Продължителност на РП1** – от Месец 1 до Месец 24

#### 1.1. Планирани дейности

**D1.1:** Създаване на изследователски план за Научна част 1.

**D1.2:** Създаване на изследователски план за Научна част 2.

**D1.3:** Набавяне на материали за подготовка на пробите за изследването.

**D1.4:** Изготвяне на доклад за напредъка.

**D1.5:** Изготвяне на финалния отчет

#### 1.2. Осъществени дейности

**D1.1:** В началото на проекта беше разработен подробен изследователски план за Научна част 1, включващ избор на материали (покрития и подложки), методи за характеристика, времеви график и стъпки за изграждане и оптимизация на фемтосекундната установка. Планът беше съгласуван с ръководителя и съобразен с наличната апаратура и техническите ограничения.

**D1.2:** Изготвен беше отделен план за Научна част 2, насочен към изследване на стъклените подложки и параметрите на лазерната обработка, който беше актуализиран според постигнатите резултати.

**D1.3:** Подготвени бяха експериментални образци от оптични покрития и подложки и бяха осигурени допълнителни оптични елементи за доизграждане на установката.

**D1.4:** Изготвен беше междинен доклад за първата година, обобщаващ научните резултати, организационните дейности и проведените обучения.

**D1.5:** В края на проекта беше подготвен финален отчет за целия 24-месечен период.

#### 1.3. Постигнати резултати

**D1.1:** Разработен и съгласуван подробен изследователски план за Научна част 1.

**D1.2:** Изготвен и актуализиран изследователски план за Научна част 2.

**D1.4:** Подготвен междинен доклад за напредъка за периода на първата година.

**D1.5:** Подготвен финален отчет на проекта.

### Работен пакет 2: Научна част 1

**Продължителност на РП2** – от Месец 2 до Месец 12

Поради обема и характера на експерименталната работа дейностите по този работен пакет продължиха и през втората година на проекта, като се реализираха паралелно с предвидените задачи по Работен пакет 3.

## 2.1. Планирани дейности

**D2.1/ M2.1:** Подготовка и получаване на експериментални образци на тънкослойни оптични покрития от различни диелектрични материали (напр.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и др.) върху подходящи оптични подложки.

**D2.2/ M2.2:** Изграждане на експериментална установка за фемтосекундна лазерна повърхностна модификация.

**D2.3:** Определяне на оптимални режими на обработка за повърхностна модификация на оптичните покрития, водещи до желани промени в техните свойства.

## 2.2. Осъществени дейности

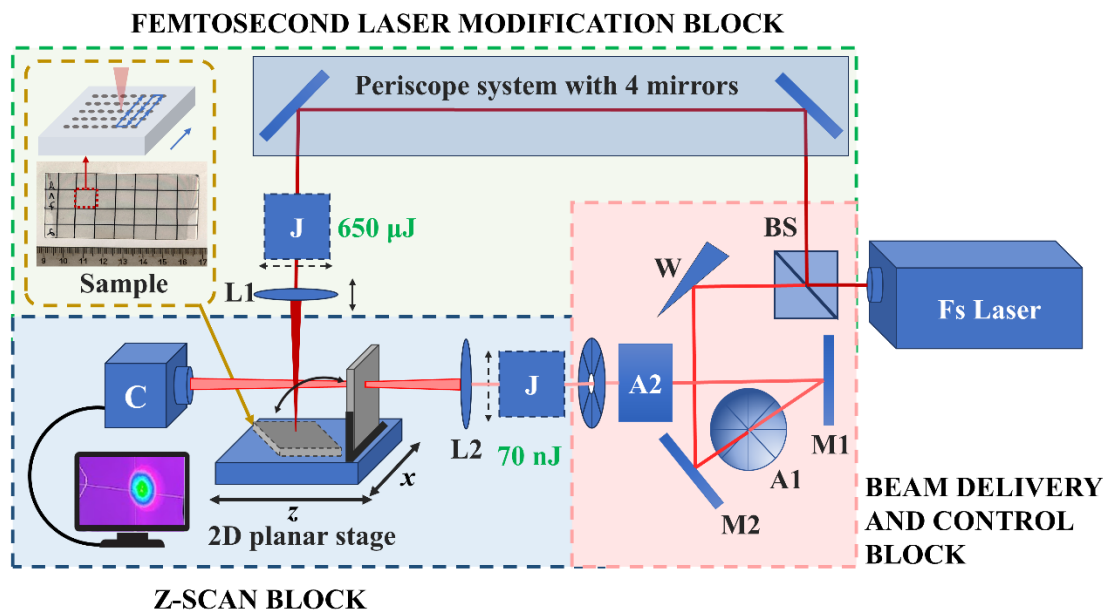
**D2.1:** В рамките на дейността бяха подготвени единични слоеве  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$  върху стъклени подложки. Тези материали бяха избрани поради широкото им приложение в оптичните покрития, високата прозрачност и химична стабилност, както и поради различните им показатели на пречупване, което позволява сравнителен анализ на лазерно-индуцираните изменения. Различията в техните оптични и структурни свойства дават възможност за оценка на ефекта от фемтосекундната обработка при материали с нисък, среден и висок показател на пречупване.

- **Образец T1** – единичен слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  върху боросиликатно стъкло. Покритието е нанесено чрез електроннолъчево изпарение във високовакуумна система Symphony 9 върху предварително почистени боросиликатни подложки  $120 \times 80$  mm, монтирани на планетарен държач за добра равномерност. Проведено е йонно ецване с  $\text{Ar}^+$  при  $3 \times 10^{-5}$  torr за почистване и подобряване на адхезията, след което  $\text{Al}_2\text{O}_3$  е отложен при  $\sim 2 \text{ \AA/s}$  върху подложки, нагreti до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  в кислородна атмосфера, като дебелината и скоростта са контролирани с QCM и Inficon IC6; полученият слой е с дебелина около 760–790 nm.
- **Образец T2** – единичен слой  $\text{SiO}_2$  върху боросиликатно стъкло. Преди отлагане е извършено 2,5-минутно йонно ецване с  $\text{Ar}^+$  при  $3 \times 10^{-5}$  torr и последващо достигане на базово налягане  $2 \times 10^{-5}$  torr. Слойт  $\text{SiO}_2$  е нанесен върху боросиликатни подложки  $120 \times 80$  mm, нагreti до  $\sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ , при подаване на 10 sccm  $\text{O}_2$  и работа на изпарителя EB2 при 8 kV и ток 58–63 mA, със скорост 3,4–6,0  $\text{ \AA/s}$  и налягане  $3,4\text{--}4,0 \times 10^{-5}$  torr. Дебелината и скоростта са контролирани с QCM и Inficon IC6; номинално  $\sim 520$  nm, а от спектрални измервания – 595–632 nm по площ.
- **Образец T3** – единичен слой  $\text{TiO}_2$  върху натриево-калциево стъкло. Слойт  $\text{TiO}_2$  е отложен върху подложка  $75 \times 38$  mm, дебелина 1 mm, след ултразвуково почистване в разтвор на препарат, деионизирана вода и изопропилов алкохол и монтиране на стационарен държач. Извършено е

2,5-минутно йонно ецване с  $\text{Ar}^+$  при  $\sim 3 \times 10^{-5}$  torr, а отлагането е проведено при налягане  $\sim 8 \times 10^{-5}$  torr без допълнително нагряване или йонно асистиране. Скоростта на отлагане е поддържана около  $2 \text{ \AA}/\text{s}$ , контролирана чрез QCM и Inficon IC6 при подаване на  $10 \text{ sccm O}_2$ , като е получен нископлътен аморфен слой  $\text{TiO}_2$ , впоследствие използван за лазерна обработка с различен брой импулси.

**D2.2:** За нуждите на проекта бяха изградени паралелно две експериментални установки – за фемтосекундна лазерна повърхностна модификация и за z-scan измервания на нелинейни оптични параметри, работещи с общ лазерен източник Ti:sapphire система Spitfire Ace ( $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $\nu = 1 \text{ kHz}$ ,  $\tau = 35 \text{ fs}$ ,  $E=650 \text{ \mu J}$ ) (Фигура 1). Лазерният сноп се разделя посредством светоделител на два канала – към блока за модификация и към блока за z-scan, като в модула за модификация е реализирана перископна система от нискодисперсионни огледала, измервател на енергията и фокусираща леща с  $f = 100 \text{ mm}$  на микрометрична стойка, позволяваща регулиране на диаметъра на петното върху експерименталния образец. Образците са монтирани върху двuosна транслационна маса Aerotech ( $100 \times 100 \text{ mm}$  ход, субмикронна точност), която осигурява сканиране по серпентинен режим и контрол на броя импулси, попадащи в една точка чрез регулиране на скоростта на движение.

В z-scan модула снопът преминава през система от нискодисперсионни огледала и елементи за грубо и фино отслабване на енергията, след което се фокусира с леща  $f = 250 \text{ mm}$  при енергия преди лещата около  $70 \text{ nJ}$ , оптимизирана за надеждни измервания без увреждане на пробите. Пробата е монтирана перпендикулярно на снопа върху същата Aerotech маса и се премества по оста z, като се регистрира пропускането в зависимост от позицията според стандартната z-scan методика. Пространственият профил и стабилността на снопа се контролират с профилна камера BGPUSB-L11059 (Ophir), позиционирана след фокуса, което позволява надеждна оценка на качеството на лъча по време на измерванията, като данните се осредняват по серия от последователни кадри.



**Фигура 1.** Схематично представяне на експерименталната установка за фемтосекундна лазерна модификация на повърхността и z-сканиране.

**D2.3:** Бяха проведени серии от експерименти по фемтосекундна лазерна модификация на единични слоеве  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$  при систематично вариране на диаметъра на петното, чрез което се изменяше плътността на потока на енергията при поддържане на постоянна енергия в импулса, както и на броя импулси в една точка, контролиран чрез скоростта на сканиране на транслационната маса. Идентифицирани бяха граници, при които се наблюдават стабилни промени в оптичните свойства без видимо увреждане на покритието. На тази основа бяха определени работни диапазони на плътност на потока на енергията и брой импулси, които се използват като практически „оптимални“ режими за последващи изследвания на модифицираните оптични слоеве.

След набор от тестове бяха подбрани няколко работни диаметъра на лазерното петно, осигуряващи плътности на потока на енергията в диапазона  $F \approx 0.07 - 0.23 \text{ J/cm}^2$ , подходящи за сравнителен анализ. Допълнително беше вариран броят импулси, попадащи в една точка от повърхността на образците, в диапазона от 0 до 300 импулса.

### 2.3. Постигнати резултати

**M2.1:** Подготвени са експериментални образци с единични слоеве  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$  с контролирана дебелина, подходящи за систематични обработки и измервания.

**M2.2:** Изградена е комбинирана установка за фемтосекундна модификация и z-scan измервания с контролируеми плътност на потока на енергията и брой импулси, попадащи в една точка.

**D2.3:** Определени са работни диапазони на плътност на потока на енергията ( $F \approx 0.07\text{--}0.23 \text{ J/cm}^2$ ) и брой импулси (0–300), при които се получават стабилни модификации без видимо увреждане на покритията.

### Работен пакет 3: Научна част 2

**Продължителност на РПЗ** – от месец 14 до месец 24

#### 3.1. Планирани дейности

**D3.1./ M3.1:** Подготовка на образци чрез избор и осигуряване на подходящи материали за подложки за тънкослойни покрития (топен кварц, боросиликатно стъкло, BK7 и др.).

**D3.2:** Постигане на оптимални параметри на лазерна обработка за модификация на повърхността на оптичните подложки.

**M3.2:** Опит за подобряване на тяхната функционализация в по-нататъшни процеси на отлагане на тънки филми.

#### 3.2. Осъществени дейности

**D3.1:** За нуждите на РПЗ бяха подбрани три групи стъклени подложки с различни оптични характеристики, подходящи за систематично изследване на влиянието на фемтосекундната модификация:

- **BSG** – Боросиликатни микроскопски стъкла Corning (C1–C5) – с минимално собствено поглъщане и добре характеризирани оптични свойства, използвани като референтен материал и стандартни подложки за модификация.
- **OG** – Предметни микроскопски стъкла Marienfeld (O1–O5) – търговски стъкла с дебелина около 1 mm и поглъщане от порядъка на 4–5%, подбрани като представител на широко използван клас оптични/лабораторни стъкла с по-високо поглъщане.
- **B270** – Стъкла B270 на SCHOTT (B1–B12) – избрани като евтин и добър заместител на BK7, с близки до него показатели на пречупване и пропускане, подходящи както за фундаментални изследвания, така и за моделиране на реални оптични приложения.

Изборът беше направен с оглед:

- добра оптична прозрачност във видимия и близкия ИЧ диапазон,
- контролируем химичен състав,
- широко индустриално приложение като подложки за тънкослойни покрития,
- различия в структурата и термомеханичните характеристики, позволяващи сравнителен анализ.

Подложките бяха предварително почистени по стандартна лабораторна процедура с цел минимизиране на повърхностни замърсявания и осигуряване на възпроизводимост на последващите лазерни обработки.

**D3.2/ M3.2:** В рамките на дейността беше направен опит за подобряване на функционализацията на стъклените подложки чрез фемтосекундна лазерна модификация с цел използването им в по-нататъшни процеси на отлагане на тънки оптични филми. Проведени бяха серии от обработки при различни комбинации от плътност на потока на енергията ( $F \approx 0.07 - 0.1 \text{ J/cm}^2$ ) и брой импулси (0 – 500 импулса), съпътствани от спектрофотометрични и микроскопски измервания на модифицираните повърхности. Въпреки наблюдаваните промени в оптичния отговор и морфологията на подложките, тези модификации не доведоха до еднозначно и възпроизводимо подобрене на качеството на последващо нанесените тънки слоеве в сравнение с немодифицирани подложки. Поради това първоначално заложената хипотеза за ясно изразено повишаване на функционализацията на подложките чрез фемтосекундна обработка не беше потвърдена в рамките на настоящия проект. Получените резултати по-скоро очертават потенциал на лазерно модифицираните стъкла за самостоятелни фотонни приложения (например като структурирани или разсейващи елементи), отколкото като подложки, осигуряващи предимство при стандартни технологични процеси за нанасяне на оптични покрития. В този смисъл дейността е частично изпълнена – проведени са планираните експерименти и анализи, но не са постигнати очакваните положителни ефекти върху функционализацията, което се отчита като важен резултат за бъдещо планиране на подобни изследвания.

### 3.3. Постигнати резултати

**M3.1:** Подбрани и подготвени експериментални образци от три типа стъклени подложки с добре известни оптични характеристики – боросиликатни микроскопски стъкла (BSG), предметни микроскопски стъкла (OG) и стъкла B270.

**D3.2:** Бяха определени работни диапазони на плътност на потока на енергията ( $F \approx 0.07 - 0.1 \text{ J/cm}^2$ ) и брой импулси в една точка (0 – 500).

**M3.2:** Проведени са опити за оценка на потенциала на лазерно модифицираните подложки като основа за последващо нанасяне на оптични покрития, като се установи, че в случая лазерната повърхностна модификация не би довела до предимство при изработването на висококачествени интерференчни филми.

## Работен пакет 4: Аналитична оценка

**Продължителност на РП4** – от месец 2 до месец 12 и от месец 14 до месец 24

### 4.1. Планирани дейности

**D4.1:** Характеризиране на линейните оптични свойства на материалите преди и след модификация чрез елипсометрия и спектрофотометрия (UV-VIS-IR).

**D4.2:** Характеризиране на нелинейните оптични свойства на материалите чрез експериментално измерване на нелинейния показател на пречупване  $n_2$  и коефициента на многофотонно поглъщане  $\beta$  чрез модифициран z-scan метод.

**D4.3:** Характеризиране на повърхностната морфология и топография на материалите преди и след модификация чрез оптична микроскопия, сканираща електронна микроскопия (SEM) и атомно-силова спектроскопия (AFM).

**D4.4:** Характеризиране на химичната структура на материалите преди и след модификация чрез Раманова спектроскопия, рентгенова дифракционна спектроскопия (XRD) и инфрачервена спектроскопия с преобразуване на Фурие (FTIR).

**M4.1:** Характеризиране на физикохимичните свойства на материалите преди модификацията.

**M4.2:** Характеризиране на физикохимичните свойства на материалите след модификацията.

## 4.2. Осъществени дейности

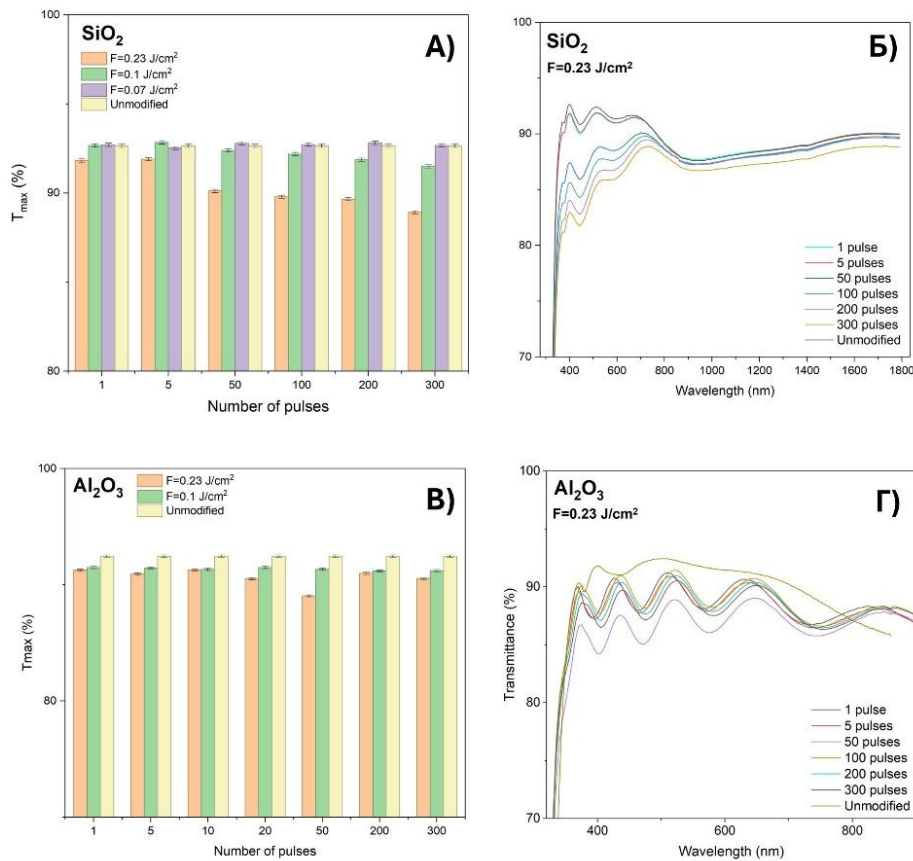
В рамките на РП4 резултатите от аналитичната оценка ще бъдат представени комплексно, групирани по вид на изследваните образци (подложки и оптични покрития) със съответните интерпретации. Аналитичната методология, която беше подбрана, се състои от:

- Спектрофотометрични измервания на линейната оптична пропускливост в (UV-Vis-IR).
- Z-scan измервания на нелинейните оптични свойства.
- Повърхностна морфология чрез 3D оптичен профиломер, SEM и AFM.
- Структурни характеристики чрез FTIR и XRD.

### Основни резултати по Научна част 1:

*Експерименти с тестови образци T1 и T2.* Тестови образци от  $Al_2O_3$  (T1) и  $SiO_2$  (T2) бяха модифицирани по описаната методология. Целта беше да се изследва промяната в линейния и нелинейния оптичен отклик на покритията, които бяха последователно измерени със спектрофотометрия в диапазона 320 – 1790 nm и с модифициран z-scan метод, съответно. Повече информация относно z-scan метода може да се намери в приложената към отчета публикация.

На Фигура 2 са представени сравнителни графики и спектри на оптичната пропускливост, представящи линейния оптичен отклик на образците спрямо лазерната модификация. Сравнителният анализ на линейната оптична пропускливост показва, че фемтосекундната лазерна обработка в използвания диапазон протича предимно в суб-аблативен режим, без да предизвиква рязко влошаване на прозрачността на покритията. И при  $SiO_2$ , и при  $Al_2O_3$  се наблюдават относително малки изменения в максималната пропускливост, което показва, че не настъпва съществена структурна деградация или силно увеличение на поглъщането.



**Фигура 2.** Зависимости на линейния оптичен отклик от различните параметри на модификация. **А)** Сравнителна графика на максимална оптична пропускливост  $T_{max}$  в зависимост от брой импулси при различни плътности на потока на енергията  $F$  за  $\text{SiO}_2$ . **Б)** Спектри на измерената оптична пропускливост в зависимост от броя импулси при плътност на потока на енергията  $F=0.23 \text{ J/cm}^2$  за  $\text{SiO}_2$ . **В)** Сравнителна графика на максимална оптична пропускливост  $T_{max}$  в зависимост от брой импулси при различни плътности на потока на енергията  $F$  за  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . **Г)** Спектри на измерената оптична пропускливост в зависимост от броя импулси при плътност на потока на енергията  $F=0.23 \text{ J/cm}^2$  за  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Грешките са изчислени, отчитайки експерименталната грешка на апаратурата.

При  $\text{SiO}_2$  се отчита по-ясно изразена зависимост от плътността на потока на енергията и броя импулси. При по-висока плътност на потока на енергията се наблюдава постепенно понижаване на  $T_{max}$  с увеличаване на броя импулси, което предполага кумулативен ефект. Най-вероятната причина е формиране на дефектни центрове или слабо повишено разсейване, без обаче да се променя съществено спектралната форма. Липсата на значимо спектрално отместване на интерференчните фринджове показва, че дебелината и линейният показател на пречупване остават практически непроменени.

При  $\text{Al}_2\text{O}_3$  измененията са по-слабо изразени, което свидетелства за по-висока устойчивост на материала към фемтосекундна модификация в изследвания параметричен диапазон. Макар да се наблюдава леко понижаване на

пропускливостта при по-голям брой импулси, спектралната форма остава стабилна и не се регистрират индикации за значима промяна в оптичната структура на слоя.

В обобщение, резултатите показват, че използваната лазерна обработка води до умерени кумулативни изменения, по-изразени при SiO<sub>2</sub>, но без съществено нарушение на линейните оптични свойства. Това потвърждава, че модификацията вероятно засяга предимно дефектната структура или локалната плътност, без да предизвиква макроскопска промяна в оптичната функционалност на покритията.

Числените стойности на нелинейния показател на пречупване и коефициента на многофотонно поглъщане, изчислени от z-scan кривите, са систематизирани в таблици 1 и 2.

**Таблица 1.** Числени стойности на нелинейните показатели на пречупване  $n_2$  и нелинейните коефициенти на поглъщане в спрямо приложените плътност на потока на енергията и брой импулси в една точка при тънко диелектрично покритие SiO<sub>2</sub>.

КОНТРОЛИ				
Контрол 1 Подложка		$n_2=(9.1 \pm 1.7) \times 10^{-20}$ $\beta=(4 \pm 0.7) \times 10^{-13}$		
Контрол 2 Немодифицирано покритие		$n_2=(3.9 \pm 0.7) \times 10^{-19}$ $\beta=(6.8 \pm 1.2) \times 10^{-14}$		
МОДИФИКАЦИЯ				
		1	2	3
		D <sub>spot</sub> =0.6 mm F=0.23 J/cm <sup>2</sup>	D <sub>spot</sub> =0.9 mm F=0.1 J/cm <sup>2</sup>	D <sub>spot</sub> =1.1 mm F=0.07 J/cm <sup>2</sup>
1	1 импулс	$n_2=(3 \pm 0.5) \times 10^{-19}$ $\beta=(4 \pm 0.7) \times 10^{-14}$	$n_2=(3.3 \pm 0.5) \times 10^{-19}$ $\beta=(4 \pm 0.7) \times 10^{-14}$	$n_2=(3.8 \pm 0.6) \times 10^{-19}$ $\beta=(4 \pm 0.7) \times 10^{-14}$
2	5 импулса	$n_2=(1.1 \pm 0.2) \times 10^{-19}$ $\beta=(6 \pm 1.0) \times 10^{-16}$	$n_2=(4.9 \pm 0.8) \times 10^{-20}$ $\beta=(4 \pm 0.7) \times 10^{-14}$	$n_2=(1.9 \pm 0.3) \times 10^{-19}$ $\beta=(4.5 \pm 0.8) \times 10^{-14}$
3	10 импулса	$n_2=(4.9 \pm 0.8) \times 10^{-20}$ $\beta=(5.6 \pm 1.0) \times 10^{-14}$	$n_2=(1.5 \pm 0.2) \times 10^{-19}$ $\beta=(4 \pm 0.7) \times 10^{-14}$	$n_2=(3.8 \pm 0.6) \times 10^{-20}$ $\beta=(5.6 \pm 1.0) \times 10^{-14}$
4	20 импулса	$n_2=(4.9 \pm 0.8) \times 10^{-20}$ $\beta=(5.6 \pm 1.0) \times 10^{-14}$	$n_2=(1.5 \pm 0.2) \times 10^{-19}$ $\beta=(4.5 \pm 0.8) \times 10^{-14}$	$n_2=(4.1 \pm 0.7) \times 10^{-19}$ $\beta=(4.5 \pm 0.8) \times 10^{-14}$
5	50 импулса	$n_2=(4.9 \pm 0.8) \times 10^{-20}$ $\beta=(4 \pm 0.7) \times 10^{-14}$	$n_2=(1.5 \pm 0.2) \times 10^{-19}$ $\beta=(4.5 \pm 0.8) \times 10^{-14}$	$n_2=(5.3 \pm 0.9) \times 10^{-20}$ $\beta=(8 \pm 1.4) \times 10^{-14}$
6	100 импулса	$n_2=(5.3 \pm 0.9) \times 10^{-20}$ $\beta=(5 \pm 0.9) \times 10^{-14}$	$n_2=(1.5 \pm 0.2) \times 10^{-19}$ $\beta=(3.4 \pm 0.6) \times 10^{-14}$	$n_2=(1.5 \pm 0.2) \times 10^{-19}$ $\beta=(8 \pm 1.4) \times 10^{-14}$
7	200 импулса	$n_2=(4.9 \pm 0.8) \times 10^{-20}$ $\beta=(6.4 \pm 1.1) \times 10^{-14}$	$n_2=(2.6 \pm 0.4) \times 10^{-18}$ $\beta=(6.8 \pm 1.2) \times 10^{-14}$	$n_2=(4.1 \pm 0.7) \times 10^{-19}$ $\beta=(5.6 \pm 1.0) \times 10^{-14}$
8	300 импулса	$n_2=(4.1 \pm 0.7) \times 10^{-20}$ $\beta=(5.3 \pm 0.9) \times 10^{-14}$	$n_2=(3.8 \pm 0.6) \times 10^{-19}$ $\beta=(2.6 \pm 0.4) \times 10^{-14}$	$n_2=(1.9 \pm 0.3) \times 10^{-19}$ $\beta=(8.3 \pm 1.5) \times 10^{-14}$

**Таблица 2.** Експериментална схема на приложения брой импулси и съответната плътност на енергията на лазерния сноп на тънко диелектрично покритие Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Забележка: Използваната енергия в импулса при z-scan измерванията е 220 nJ.

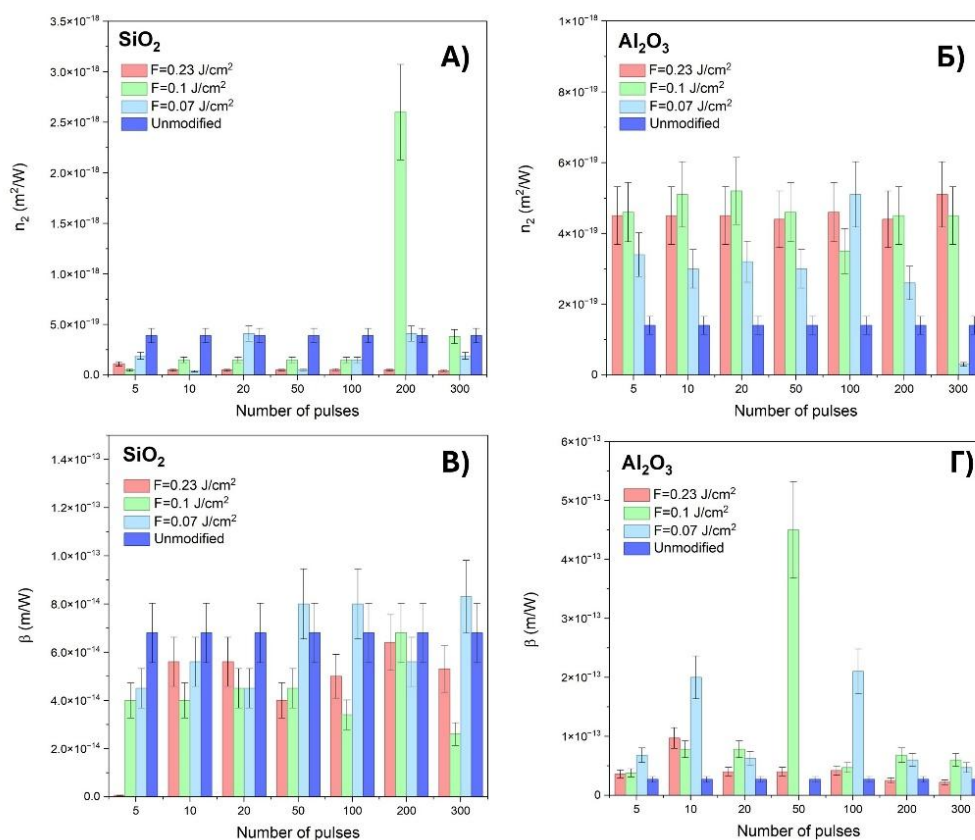
КОНТРОЛИ	
Контрол 1 Подложка	$n_2=(9.1 \pm 1.7) \times 10^{-20}$ $\beta=(4 \pm 0.7) \times 10^{-13}$

Контрол 2 Немодифицирано покрите		$n_2=(1.4 \pm 0.2) \times 10^{-19}$ $\beta=(2.7 \pm 0.4) \times 10^{-14}$		
МОДИФИКАЦИЯ		1	2	3
		$D_{spot}=0.6 \text{ mm}$ $F=0.23 \text{ J/cm}^2$	$D_{spot}=0.9 \text{ mm}$ $F=0.1 \text{ J/cm}^2$	$D_{spot}=1.1 \text{ mm}$ $F=0.07 \text{ J/cm}^2$
1	1 импулс	$n_2=(5.1 \pm 0.9) \times 10^{-19}$ $\beta=(7.3 \pm 1.3) \times 10^{-14}$	$n_2=(4.6 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=$	$n_2=$ $\beta=$
2	5 импулса	$n_2=(4.5 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=(3.6 \pm 0.6) \times 10^{-14}$	$n_2=(4.6 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=(3.8 \pm 0.6) \times 10^{-14}$	$n_2=(3.4 \pm 0.6) \times 10^{-19}$ $\beta=(6.8 \pm 1.2) \times 10^{-14}$
3	10 импулса	$n_2=(4.5 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=(9.7 \pm 1.7) \times 10^{-14}$	$n_2=(5.1 \pm 0.9) \times 10^{-19}$ $\beta=(7.8 \pm 1.4) \times 10^{-14}$	$n_2=(3 \pm 0.5) \times 10^{-19}$ $\beta=(2 \pm 0.3) \times 10^{-13}$
4	20 импулса	$n_2=(4.5 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=(4 \pm 0.7) \times 10^{-14}$	$n_2=(5.2 \pm 0.9) \times 10^{-19}$ $\beta=(7.8 \pm 1.4) \times 10^{-14}$	$n_2=(3.2 \pm 0.5) \times 10^{-19}$ $\beta=(6.3 \pm 1.1) \times 10^{-14}$
5	50 импулса	$n_2=(4.4 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=(4 \pm 0.7) \times 10^{-14}$	$n_2=(4.6 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=(4.5 \pm 0.8) \times 10^{-13}$	$n_2=(3 \pm 0.5) \times 10^{-19}$ $\beta=$
6	100 импулса	$n_2=(4.6 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=(4.2 \pm 0.7) \times 10^{-14}$	$n_2=(3.5 \pm 0.6) \times 10^{-19}$ $\beta=(4.7 \pm 0.8) \times 10^{-14}$	$n_2=(5.1 \pm 0.9) \times 10^{-19}$ $\beta=(2.1 \pm 0.3) \times 10^{-13}$
7	200 импулса	$n_2=(4.4 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=(2.5 \pm 0.4) \times 10^{-14}$	$n_2=(4.5 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=(6.8 \pm 1.2) \times 10^{-14}$	$n_2=(2.6 \pm 0.4) \times 10^{-19}$ $\beta=(6 \pm 1.0) \times 10^{-14}$
8	300 импулса	$n_2=(5.1 \pm 0.9) \times 10^{-19}$ $\beta=(2.2 \pm 0.3) \times 10^{-14}$	$n_2=(4.5 \pm 0.8) \times 10^{-19}$ $\beta=(6 \pm 1.0) \times 10^{-14}$	$n_2=(3 \pm 0.5) \times 10^{-20}$ $\beta=(4.7 \pm 0.8) \times 10^{-14}$

Фигура 3 показва ясно изразена зависимост на нелинейните параметри от плътността на потока на енергията и броя импулси, като поведението е съществено различно за двата материала. За покритието от  $\text{SiO}_2$  резултатите от z-scan измерванията показват, че нелинейният показател на пречупване  $n_2$  остава малък и близък по стойност до този на немодифицирания слой в широк диапазон от брой импулси и плътност на потока на енергията, като съществено увеличение се наблюдава само в единични точки (напр. при 200 импулса с  $F=0.1 \text{ J/cm}^2$ ), придружено от по-голяма неопределеност. Коефициентът на нелинейно поглъщане  $\beta$  също варира в сравнително тесен интервал около стойностите за немодифицирания образец, без ясно изразена монотонна тенденция с нарастване на броя импулси, което показва, че при избраните режими  $\text{SiO}_2$  слой запазва в голяма степен първоначалните си нелинейни оптични характеристики.

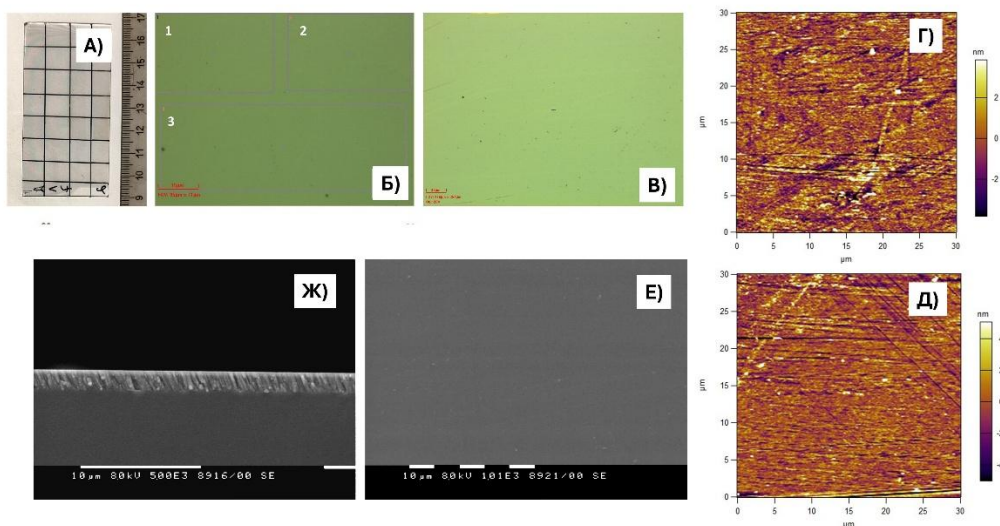
При покритието от  $\text{Al}_2\text{O}_3$  се наблюдава по-отчетлив ефект върху нелинейните оптични свойства – стойностите на  $n_2$  за модифицираните области систематично надвишават тези на немодифицирания слой за всички разгледани плътности на потока на енергията и брой импулси, което свидетелства за повишен нелинеен отклик на материала след обработка. При определени комбинации (например при 100 импулса с  $F=0.07 \text{ J/cm}^2$ ) се регистрират локални максимуми на  $n_2$ , което може да се свърже с формиране на микроструктури или промени в плътността/състоянието на слоя. Нелинейното поглъщане  $\beta$  показва по-силни вариации: за част от режимите се наблюдава повишение спрямо немодифицирания образец, включително

изразени пикове (при 50 импулса с  $F=0.1 \text{ J/cm}^2$ ), което подсказва наличие на допълнителни нелинейни канали на поглъщане или дефектни състояния, индуцирани от лазерната обработка.

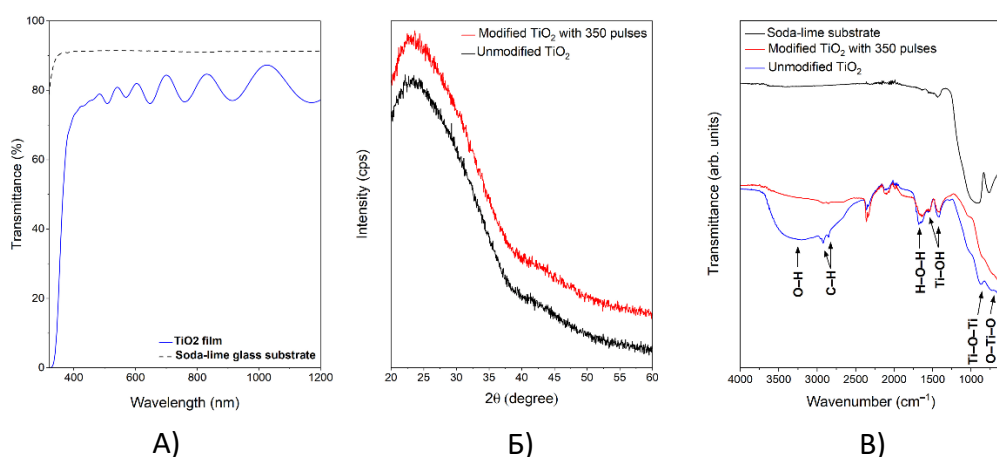


**Фигура 3.** Графични зависимости на ефективните нелинейни оптични параметри от броя приложени фемтосекундни лазерни импулси за тънки филми от  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при различни стойности на плътността на потока на енергията. **А)** Ефективен нелинеен показател на пречупване  $n_2$  за  $\text{SiO}_2$ ; **Б)** ефективен нелинеен показател на пречупване  $n_2$  за  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; **В)** ефективен коефициент на нелинейно поглъщане  $\beta$  за  $\text{SiO}_2$ ; **Г)** ефективен коефициент на нелинейно поглъщане  $\beta$  за  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . За сравнение са представени и немодифицираните образци. Грешките са изчислени като стандартно отклонение от многократни z-scan измервания.

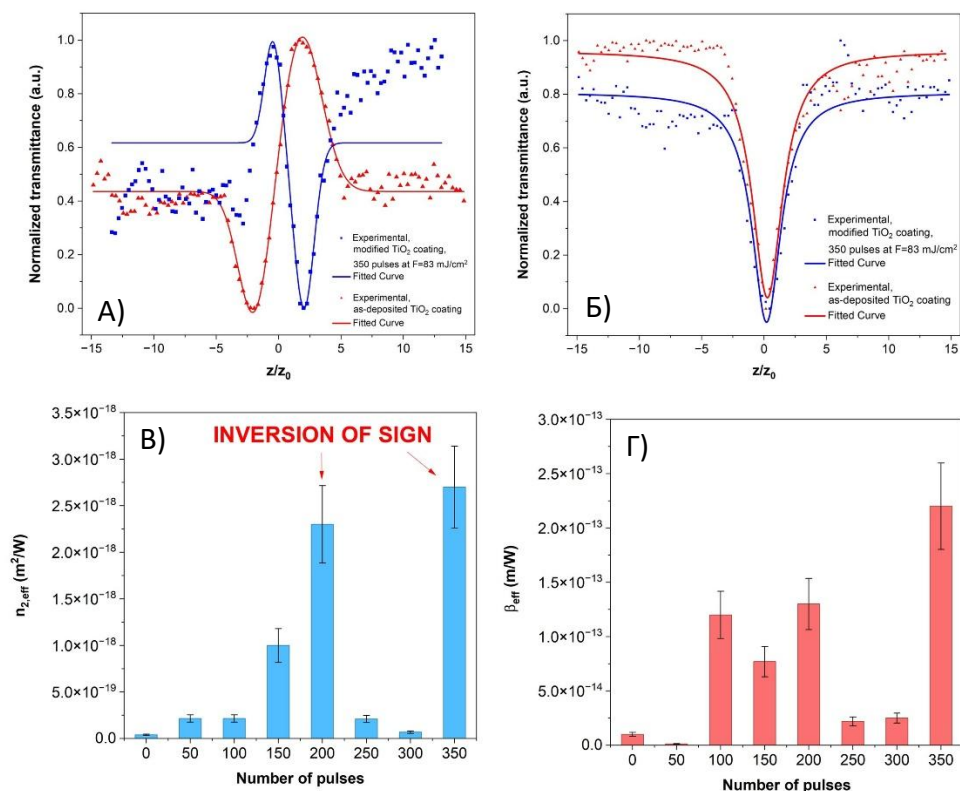
Експерименти с тестов образец ТЗ. Тестов образец от  $\text{TiO}_2$  (ТЗ) беше модифицирани по описаната методология. Оценката на фемтосекундната лазерна модификация беше подкрепена с разширен аналитичен апарат, включващ наблюдения на морфологичната цялост с 3D оптичен профиломер, SEM и AFM (Фигура 4), спектрофотометрични измервания на оптичната пропускливост в диапазона 320 – 1790 nm и наблюдения на структурни изменения с FTIR и XRD (Фигура 5). Целта беше да се изследва промяната в нелинейния оптичен отклик на покритието, който беше последователно измерен с модифициран z-scan метод (Фигура 6).



**Фигура 4.** Изследвания на морфологията на образеца преди и след фемтосекундна лазерна модификация. **А)** Образец ТЗ. Оптична микроскопия преди **(Б)** и след **(В)** модификация. Атомно силова микроскопия преди **(Г)** и след **(Д)** модификация. Сканираща електронна микроскопия след модификация **(Е)** и в напречно сечение **(Ж)**.



**Фигура 5. А)** UV-Vis-NIR спектри на пропускане на немодифицираното  $TiO_2$  покритие и натриево-калциево-стъклената подложка в диапазона 320–1200 nm. **Б)** рентгеноструктурен анализ (XRD) на немодифицираното и модифицираното с 350 импулса  $TiO_2$  покритие. **В)** ATR-FTIR спектри на натриево-калциевата подложка, немодифицираното  $TiO_2$  покритие и лазерно модифицираното  $TiO_2$  покритие.



**Фигура 6.** Нелинеен отклик на ТЗ. **А)** z-scan криви на нелинейното пречупване на модифицирано и немодифицирано покритие. **Б)** z-scan криви на нелинейното поглъщане на модифицирано и немодифицирано покритие. Еволюция на нелинейния показател на пречупване  $n_2$  (**В)** и нелинейния коефициент на поглъщане  $\beta$  (**Г)** като функция от броя на фемтосекундните лазерни импулси на петно.

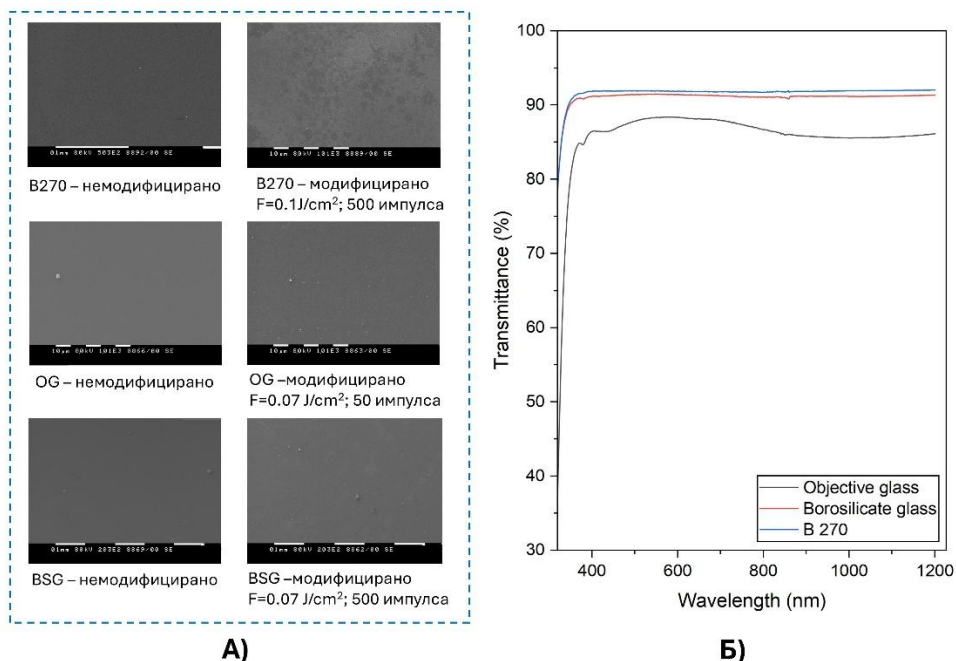
Основните резултати показват, че е постигнат режим на модификация (при  $F=0.083 \text{ J/cm}^2$ ), водещ до съществено изменение на нелинейните оптични свойства от трети ред на аморфни TiO<sub>2</sub> тънки филми, без да предизвиква аблация, повърхностна деградация или кристализация на покритието, което е от съществено значение за запазването на високата му функционална ефективност. Немодифицираният слой проявява отрицателен ефективен нелинеен показател на пречупване (самодефокусиращ се отклик), докато при по-голям брой импулси (200–350) се наблюдава увеличаване на абсолютните стойности на  $n_{2,\text{eff}}$  и  $\beta_{\text{eff}}$  и обръщане на знака на  $n_{2,\text{eff}}$  към самофокусиращ се режим. Зависимостта от броя импулси е немонотонна, което предполага участие на конкуриращи се механизми, свързани с лазерно-индуцирана модификация на дефектни състояния и локална структурна релаксация в аморфната мрежа. Повече информация е представена в:

Atanassova, V., Yankov, G., Shumanov, K., Karatodorov, S., Miloushev, I., Tenev, T., Iordanova, E., Strijkova, V., Katrova, V., & Zahariev, I. (2026). Sub-Ablative Femtosecond Laser Modification of the Nonlinear Optical Response of Amorphous TiO<sub>2</sub> Thin Films. *Coatings*, 16(2), 220. <https://doi.org/10.3390/coatings16020220>

## Основни резултати по Научна част 2:

На Фигура 7 са представени SEM изображения и спектрофотометрични измервания на линейната оптична пропускливост на стъклените подложки, използвани в рамките на Научна част 2. SEM анализът показва, че фемтосекундната обработка води до поява на фина повърхностна текстура при B270, докато при боросиликатното и обективното стъкло не се наблюдават съществени морфологични изменения. При избраните режими не се установяват макроскопични повреди или напуквания, което потвърждава суб-аблативния (под прага на аблация) характер на обработката. Спектрофотометричните измервания на немодифицираните образци потвърждават високата им пропускателна способност в разглеждания спектрален диапазон и малките различия между отделните типове стъкло, което ги прави подходящи като подложки за оптични покрития. Наблюдаваната лазерно-индуцирана текстуризация обаче би довела до увеличено разсейване и потенциално влошаване на интерференчните характеристики при последващо нанасяне на висококачествени оптични слоеве. В този смисъл експерименталните резултати не потвърждават първоначалната хипотеза, че лазерната модификация би подобрила функционализацията на подложките за оптични покрития в рамките на използвания параметричен диапазон.

Въпреки това, получените резултати демонстрират възможност за контролирано формиране на повърхностна текстура, което открива потенциал за приложения, при които се изисква дифузно или контролирано разсейване на светлината.



**Фигура 7. А)** SEM образи на различни стъклени подложки – B270, микроскопско предметно стъкло (OG) и боросиликатно стъкло (BSG), преди и след фемтосекундна лазерна обработка състояние при различни стойности на плътността на потока на енергията и брой импулси. **(Б)** Спектрофотометрични измервания на линейното оптично пропускане на изследваните подложки в диапазона 320–1200 nm.

#### 4.3. Постигнати резултати

**M4.1./ M4.2:** За трите диелектрични покрития ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) и стъклените подложки (B270, боросиликатно и предметно стъкло) са получени и систематично анализирани данни за физикохимичните им свойства преди и след фемтосекундна модификация.

- ✓  $\text{SiO}_2$  покритието запазват висока пропускливост ( $T_{\text{max}} \approx 90\%$ ) в UV–VIS–NIR областта и показват само слаби вариации на нелинейните параметри  $n_2$  и  $\beta$  спрямо немодифицирания слой, което показва, че в разгледаните работни режими фемтосекундната обработка не изменя съществено нито линейния, нито нелинейния им оптичен отклик.
- ✓  $\text{Al}_2\text{O}_3$  покритието проявяват по-отчетливо повишаване на ефективния нелинеен показател на пречупване и вариации на коефициента на нелинейно поглъщане при определени режими, при запазване на висока прозрачност и стабилна спектрална зависимост на пропускането, демонстрирайки възможност за усилване на нелинейния отклик без съществено влошаване на линейните оптични характеристики.
- ✓  $\text{TiO}_2$  покритието показва системни и контролируеми изменения в нелинейния оптичен отклик при субаблативна обработка, включително увеличаване на абсолютните стойности на ефективните нелинейни коефициенти и експериментално установена смяна на знака на  $n_{2,\text{eff}}$  от отрицателен към положителен при по-висок брой импулси, при запазване на аморфната структура и добра линейна прозрачност. Резултатите сочат лазерно-индуцирана модификация на дефектни състояния и възможно уплътняване на филма като механизъм на промяната.
- ✓ При стъклени подложки лазерната модификация не доведе до възпроизводимо подобрене на функционализацията за висококачествени оптични покрития, но демонстрира потенциал за контролирано повърхностно текстуриране с възможни фотонни приложения.

#### Работен пакет 5: Разпространение на резултатите

**Продължителност на РП5** – от месец 3 до месец 24

##### 5.1. Планирани дейности

**D5.1/ M5.1:** Публикувана научна статия във висококачествено научно списание с възможен отворен достъп.

**D5.2/M5.2:** Участие в престижна международна конференция.

**D5.3:** Редовно представяне на научни събития.

**D5.4:** Създаване и поддържане на интернет видимост за проекта чрез уебсайта и социалните мрежи на базовата организация.

**D5.5:** Използвани платформи, предназначени за споделяне на резултати, като Mendeley Data, Open Science Framework и Zenodo, за да се направят резултатите от изследванията достъпни за по-широка аудитория.

**D5.6:** Участие в радиопредавания, тематични подкасти и телевизионни интервюта.

**D5.7:** Представяне на проектните дейности на събития с научно-популярен характер, като информационни срещи със студенти, Европейска нощ на учените, Софийски фестивал на науката, работни срещи със заинтересовани страни по тяхно искане и други.

**D5.8:** Представяне на темата на проекта пред училищна и университетска аудитория.

## 5.2. Осъществени дейности

**D5.1/ M5.1:** Част от резултатите, получени по проекта са публикувани в публикация с отворен достъп:

**Atanassova, V., Yankov, G., Shumanov, K., Karatodorov, S., Miloushev, I., Tenev, T., Iordanova, E., Strijkova, V., Katrova, V., & Zahariev, I. (2026).** Sub-Ablative Femtosecond Laser Modification of the Nonlinear Optical Response of Amorphous TiO<sub>2</sub> Thin Films. *Coatings*, 16(2), 220. **Q2, IF=2.8, SJR=0.539**, <https://doi.org/10.3390/coatings16020220>

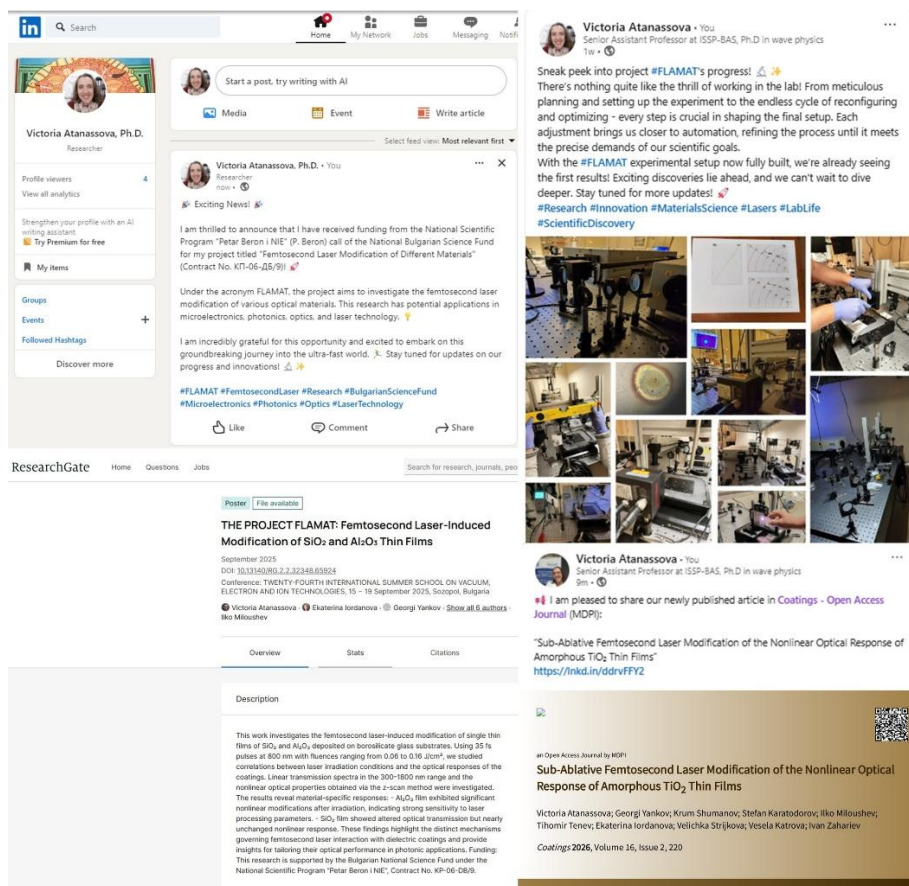
**D5.2/D5.3/ M5.2:** Дейностите по проекта бяха представени на четири международни научни форума (Повече информация в прикачените документи):

- **Victoria Atanassova, Ekaterina Iordanova.** *Femtosecond laser modification of optical thin films (Постер)*, 23<sup>rd</sup> International School on Condensed Matter Physics (ISCMP'2024), 26.08.2024 – 30.08.2024, Варна, България.
- **Victoria Atanassova, Ekaterina Iordanova.** *The project FLAMAT: Femtosecond laser modification of different materials (Постер)*, 9th edition of the Extreme Light Infrastructure Summer School (ELISS'2024), 02.09.2024 - 06.09.2024, Szeged, Hungary.
- **Victoria Atanassova, Ekaterina Iordanova.** *Femtosecond LASer Modification of different mATerials (FLAMAT) (устен доклад)*, International Conference on Optoelectronics and Heritage Science (OptoHS 2024), 09.09.2024, online.
- **Victoria Atanassova, Georgi Yankov, Krum Shumanov, Ekaterina Iordanova, Tihomir Tenev, Ilko Moloushev.** *Femtosecond laser-induced modification of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films (Постер)*, Twenty-Fourth International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies (VEIT'2025), 15.09.2025 - 19.09.2025, Созопол, България.

**D5.4:** В началото на проекта беше създадена анотация на уебсайта на базовата организация, която по-късно прерасна в разширена уеб страница на български и на английски език: <https://issp.bas.bg/project-12-femtosekundna-lazerna-modifikaciia-na-razlichni-materiali-akronim-flamat>

Отделно комуникационната стратегия на проекта беше реализирана чрез комбиниран подход, включващ личния професионален профил на главния научен изследовател в LinkedIn (<https://www.linkedin.com/in/victoria-atanassova-557082138/>),

официалните канали на базовата организация (LinkedIn и Facebook). Чрез личния профил в LinkedIn бяха публикувани регулярни постове, свързани със старта на проекта, участие в международни конференции, публикувани научни резултати и ключови етапи от изпълнението (Фигура 8). Общият органичен обхват на тези публикации надхвърля 5 000 показвания, със среден уникален обхват от приблизително 150 потребители на публикация, като най-висока ангажираност се наблюдава при представяне на научни резултати и международни форуми. Допълнително, публикацията в списание *Coatings MDPI* беше популяризирана чрез официалните комуникационни канали на издателя (Facebook, X/Twitter и LinkedIn), което разшири международния ѝ обхват извън непосредствената академична мрежа на екипа. Платформата ResearchGate също беше активно използвана чрез качване на пълния текст на статията, създаване на Research Spotlight, както и публикуване на постерни презентации от конференции. Към момента публикацията отчита 24 прочитания (Reads) и Research Interest Score 0.8, а постерът от конференцията VEIT'2025 – 33 прочитания и Research Interest Score 1.0, което показва устойчив интерес от страна на научната общност.



Фигура 8. Популяризиране на дейностите по проекта в различни социални мрежи.

**D5.6:** Планираната дейност, свързана с участие в радиопредавания, тематични подкасти и телевизионни интервюта, не беше реализирана в рамките на проекта. Причината е, че комуникационните усилия бяха насочени приоритетно към научната общност чрез публикации, участия в международни форуми и специализирани професионални платформи, където тематиката предизвика по-голям интерес и осигури

по-целева аудитория. Въпреки това проектът беше активно популяризиран чрез събития с образователен и научно-популярен характер, както и чрез дигитални канали на базовата организация.

**D5.5:** Част от резултатите по проекта са публикувани в отворената научна платформа Zenodo, като са спазени принципите на FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) за управление и споделяне на научни данни. За периода от качването си до началото на месец март данните са получили 16 преглеждания и 2 изтегляния:

**Atanassova, V., Yankov, G., & Shumanov, K. (2026).** z-scan of amorphous TiO<sub>2</sub> thin films [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18300654>

Отделно публикуваната статия е качена и в Българския портал за отворена наука.

**D5.7./ D5.8:** Дейностите по проекта бяха популяризирани пред широката общност и с активно участие в различни събития, като ден на Отворените врати на ИФТТ-БАН, Кариерни дни във Физическия факултет към СУ, организирани посещения на студенти и ученици (Фигура 9).



*Ден на отворените врати на ИФТТ-БАН*



*Организирано посещение на студенти в лабораториите на ИФТТ-БАН*



*Кариерни дни във Физическия факултет при Софийски университет „Св. Климент Охридски“*



*Фигура 9. Представяне на проектните дейности на събития с научно-популярен характер и пред училищна и университетска аудитория.*

### 5.3. Постигнати резултати

**M5.1:** Публикувана е научна статия във висококачествено научно списание (Q2) с отворен достъп.

**M5.2:** Реализирани са участия в три международни научни форума.

**D5.4:** Създадена и редовно поддържана интернет видимост на проекта чрез комбиниран модел на комуникация – чрез личен профил на основния научен изследовател в социална мрежа, официален уебсайт и социални мрежи на базовата организация и социалните мрежи на международни издателски платформи. Това осигури многопластово разпространение на резултатите, повишена видимост на проекта и устойчиво позициониране на тематиката в професионалните мрежи.

**D5.5:** Публикуването на част от суровите данни в отворено научно хранилище доведе до измерим интерес от страна на научната общност, което потвърждава практическата приложимост на резултатите и потенциала им за повторна употреба от външни изследователи в съответствие с принципите на отворената наука.

**D5.7./ D5.8:** Дейностите по проекта бяха популяризирани пред широката общност, включително пред училищна и университетска аудитория.

## II. Представяне на научните резултати

### 1. Научни публикации по проекта

- 1) **Atanassova, V., Yankov, G., Shumanov, K., Karatodorov, S., Miloushev, I., Tenev, T., Iordanova, E., Strijikova, V., Katrova, V., & Zahariev, I. (2026).** Sub-Ablative Femtosecond Laser Modification of the Nonlinear Optical Response of Amorphous TiO<sub>2</sub> Thin Films. *Coatings*, 16(2), 220. **Q2, IF=2.8, SJR=0.539**, <https://doi.org/10.3390/coatings16020220>

Част от резултатите, представени в публикацията, като процесът на нанасяне на тънките оптични слоеве върху стъклени подложки, са финансирани от проект КП-06-Н57/5. Приносът на всеки от проектите в публикацията се определя от следното процентно съотношение:

КП-06-ДБ/9	70 %
КП-06-Н57/5	30 %

### 2. Участия в научни форуми, на които са представени резултати от проекта

#### 2.1. Доклади на международни научни конференции:

- 1) **Victoria Atanassova, Ekaterina Iordanova.** *Femtosecond laser modification of optical thin films (Постер)*, 23<sup>rd</sup> International School on Condensed Matter Physics (ISCMP'2024), 26.08.2024 – 30.08.2024, Варна, България.
- 2) **Victoria Atanassova, Ekaterina Iordanova.** The project FLAMAT: Femtosecond laser modification of different materials (Постер), 9th edition of the Extreme Light Infrastructure Summer School (ELISS'2024), 02.09.2024 - 06.09.2024, Szeged, Hungary.

- 3) **Victoria Atanassova, Ekaterina Iordanova.** *Femtosecond LAser Modification of different mATerials (FLAMAT) (устен доклад)*, International Conference on Optoelectronics and Heritage Science (OptoHS 2024), 09.09.2024, online.
  - 4) **Victoria Atanassova, Georgi Yankov, Krum Shumanov, Ekaterina Iordanova, Tihomir Tenev, Ilko Moloushev.** *Femtosecond laser-induced modification of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films (Постер)*, Twenty-Fourth International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies (VEIT'2025), 15.09.2025 - 19.09.2025, Созопол, България.
- 3. Представяне на резултатите от проекта в университети и други научни организации или фирми в страната или чужбина**
- 1) Тематиката на проекта беше представена на дискуссионни срещи, проведени в рамките на лятното училище ELISS'2024 в Сегед, Унгария, както и с колеги от базовата организация и други институти на БАН с цел утвърждаване на последващо сътрудничество и надграждане на тематиката.
  - 2) Проектът беше популяризиран и пред разширен кръг от специалисти, работещи усилено в областта на опазване на културното наследство (на online международната конференция OptoHS 2024) където беше поставен фокус на дискусията за приложение на фемтосекундните лазери за модификация на свойствата на материали в културното наследство.
- 4. Популяризиране на резултати от проекта в обществото**
- 1) Главният изследовател на проекта участва активно в няколко научно-популярни събития, като ден на отворените врати на ИФТТ-БАН (18 октомври 2024 г.), есенен кариерен ден (17 октомври 2024 г.) и пролетен кариерен ден (30 май 2025 г.) във Физически факултет на СУ, където имаше възможност да популяризира тематиката и дейностите по проекта главно пред университетска и училищна аудитория. Бяха осъществени дискусии с потенциално заинтересовани студенти да продължат кариерата си в областта на оптичните и лазерните технологии с широка перспектива за приложенията на свръх-бързите лазери.
  - 2) Главният изследовател на проекта участва и в няколко организирани посещения на лазерните лаборатории на ИФТТ-БАН от студенти от различни специалности, като тематиката предизвика интерес и беше предмет на дискусии за открити възможности за кариерно надграждане.
  - 3) Беше предприета комуникационна стратегия за популяризиране на проекта в социалните мрежи, която доведе до широк импакт сред международната академична общност (описано в дейност D5.4).

### III. Други резултати от проекта

## **1. Отчет за изпълнение на Плана за експлоатация на научните резултати.**

Планът за експлоатация на научните резултати беше изпълнен съгласно заложените цели и дейности. Получените резултати бяха:

- ✓ публикувани в международно рецензирано списание с отворен достъп;
- ✓ представени на международни научни форуми;
- ✓ споделени чрез платформи за отворена наука (Zenodo, ResearchGate, Български портал за отворена наука);
- ✓ популяризирани чрез уебсайта и социалните мрежи на базовата организация и чрез професионални мрежи.

Експлоатацията на резултатите се реализира както чрез класически академични канали (публикации и конференции), така и чрез дигитални платформи, което осигури тяхната видимост, проследимост и потенциал за повторна употреба. Създадена е устойчива основа за бъдещо надграждане на тематиката чрез нови проектни предложения и разширяване на научното сътрудничество.

## **2. Повишаване на научния капацитет и подготовката на главния научен изследовател.**

Изпълнението на проекта доведе до съществено надграждане на експертизата на главния изследовател в няколко ключови технологични направления:

### **2.1. Надграждане на компетенции в областта на тънкослойните оптични покрития:**

- ✓ Задълбочени познания относно технологичните процеси на отлагане на диелектрични тънки филми чрез електроннолъчево изпарение.
- ✓ Разбиране на влиянието на вакуумните условия, кислородната атмосфера, температурния режим и йонното ецване върху адхезията, плътността и оптичните свойства на филмите.
- ✓ Практически опит в избора на подложки (боросиликатни, натриево-калциеви, B270) в зависимост от оптичните изисквания и последващата лазерна обработка.
- ✓ Анализ на интерференчни спектри за оценка на дебелина и хомогенност на слоевете.

### **2.2. Усъвършенстване на експертиза в z-scan метода и нелинейната оптика:**

- ✓ Самостоятелно конфигуриране и оптимизация на експериментална z-scan установка.
- ✓ Подбор на подходяща оптична периферия (нискодисперсионни огледала, лещи с различни фокусни разстояния, енергийни атенюатори) с цел минимизиране на хроматичната дисперсия и избягване на нежелани нелинейни ефекти в оптичните компоненти, като образуването на филаменти.

- ✓ Оптимизация на енергията преди фокусиране за избягване на увреждане на пробите и постигане на надеждни стойности на  $n_2$  и  $\beta$ .
- ✓ Контрол на пространствения профил на снопа и стабилността на импулсите чрез профилна камера.
- ✓ Обработка на експериментални данни, оценка на грешките и интерпретация на немонотонни зависимости при кумулативна импулсна обработка.

### **2.3. Работа със свръхбързи лазерни импулси:**

- ✓ Практически опит в работа с фемтосекундна лазерна система.
- ✓ Избор и конфигуриране на опто-механични компоненти за стабилност и възпроизводимост.
- ✓ Управление на параметри като плътност на потока на енергията, диаметър на петното и брой импулси в точка.
- ✓ Разбиране на границата между субаблативен и аблативен режим и нейното експериментално определяне.

### **2.4. Ползи за базовата организация от изпълнението на проекта:**

Главният изследовател предаде придобития си опит на други специалисти, млади учени и студенти от базовата организация чрез:

- ✓ въвеждане в основни принципи и технологични аспекти на FTIR анализа (ATR режим, интерпретация на вибрационни ивици, подготовка на проби);
- ✓ обучение на млади учени и студенти за безопасна работа със свръхбързи лазери;
- ✓ наставничество при обработка и интерпретация на различни видове данни;
- ✓ включване на млади изследователи в реална експериментална и публикационна дейност.

В резултат беше привлечен нов докторант, както и бяха обучени студенти и млади учени в рамките на лабораторни посещения и проектни дейности. Също така главният изследовател беше включен в екипа и на други проекти. Това създаде стабилни основи за бъдещо академично израстване с утвърден тематика в областта на свръх-бързите лазерни приложения.

### **3. Развиване на научно сътрудничество**

Проектът доведе до разширяване и задълбочаване на научните партньорства с:

- ✓ Институт по оптически материали и технологии - БАН;
- ✓ Институт по физикохимия – БАН;
- ✓ National Institute for Optoelectronics – INOE2000, Румъния.

Сътрудничеството включва обмен на експертиза, съвместни публикации, ускорено изграждане на експериментални установки и подготовка на нови проектни предложения.

### **4. Други резултати**

- ✓ Повишена международна видимост на тематиката в областта на фемтосекундната лазерна модификация.
- ✓ Утвърждаване и разширяване на изследователската група като компетентен партньор в областта на нелинейната оптика и лазерната модификация на различни материали.
- ✓ Създадена основа за бъдещи изследвания и проекти в областта на фемтосекундната лазерна модификация на различни материали, като тематиката не се ограничава само до оптични материали.