

Улсын бүртгэлийн
дугаар.....
Аравтын бүрэн
ангиллын код

Нууцын зэрэглэл: А

Төсөл хэрэгжүүлэх
гэрээний дугаар:

ШИНЖЛЭХ УХААНЫ АКАДЕМИ ФИЗИК, ТЕХНОЛОГИЙН ХҮРЭЭЛЭН

ТАЛСТЫН ОРЧИНД ФИЛАМЕНТАЦИЙН ГОРИМД ЛАЗЕРЫН
ЦАЦРАГИЙН УЛМААС ҮҮССЭН ГАЖГИЙН КОАГУЛЯЦИ БА
АГРЕГАЦЫН МЕХАНИЗМУУД

ОХУ-Монгол улсын ШУТ-ийн хамтарсан төслийн тайлан
2018-2020

Төслийн удирдагч:
Санхүүжүүлэгч байгууллага:
Захиалагч байгууллага:
Тайлан өмчлөгч:

С.Энхбат, доктор (Sc.D), Академич
Шинжлэх ухаан технологийн сан
Боловсрол, Шинжлэх Ухааны яам
Физик, технологийн хүрээлэн
Энхтайваны өргөн чөлөө, 54Б
Улаанбаатар 13330
Утас: 452819, 99198136
Э-хаяг: senkhat@rocketmail.com

Улаанбаатар

Гарчиг

Реферат	3
Түлхүүр үг:.....	4
Гүйцэтгэгчдийн нэрсийн жагсаалт	4
Төслийн үр дүнгийн даалгавар.....	4
Удиртгал.....	5
Лазерын цацрагаар шарагдсан лити фторын талстын люминесценцийн спектрийн болон кинетик шинж чанарын судалгаа	6
Талстад үүссэн гажгийн топологийн судалгаа	13
Лазерын цацрагаас үүдэлтэй сувгийн бичил бүтцийн судалгаа	17
Филаментацийн горимд лазерын гажиг үүсэх үеийн агрегацын болон коагуляцын процесс дахь бодисын дотоод халалтын үзүүлэх нөлөөллийн судалгаа	21
Лазерын импульсийн үйлчлэлээр хатуу биетэд плазмын нягт өсөх явцын математик загварчлал	26
Дүгнэлт	31
Төслийн үр дүнгээр хэвлэгдсэн бүтээлийн жагсаалт	32
Төслийн үр дүнгээр Web of Science мэдээллийн санд бүртгэлтэй импакт-фактор бүхий мэргэжлийн сэтгүүлүүдэд хэвлэгдсэн бүтээлийн жагсаалт	34
Хавсралт 1	35

Реферат

Төслөөр лазерын цацрагаар шарагдсан лити фторын талстад үүссэн гажгийн топологи, люминесценцийн спектр, кинетик шинж чанар, сувгийн бичил бүтцийг судалсан. Мөн филамент үүсэх үеийн агрегацийн болон коагуляцын процесс дахь бодисын дотоод халалтын үзүүлэх нөлөөллийг тооцооллыг аргаар судалсан, лазерын импульсийн үйлчлэлээр хатуу биетэд плазмын нягт өсөх явцын математик загварыг тодорхойлсон. Хамтарсан төслийн хүрээнд дараах ажлуудыг хийж гүйцэтгэв:

- Фемтосекундийн лазерын цацрагаар шарагдсан талстын люминесценцийн спектрийн болон кинетик шинж чанарын судалгаа лити фторын талст дээр хийж гүйцэтгэсэн.
- Фемтосекундийн лазерын цацрагаар үүсгэсэн люминесценцийн сувгууд дахь хөндлөн огтлолд үүсэх туйлшралын төвшинг ашиглан өнгөний төвүүдийн тархалт, талстад үүссэн гажгийн топологийг люминесценцийн туйлшруулагч микроскопын аргыг ашиглан тодорхойлсон.
- Лити фторын талстад үүссэн бичил бүтцийг хагас контактын сканердах горимыг ашиглан тодорхойлсон.
- Коллоид литийн нано хэсгүүдийн үүсэх процессыг плазмон-резонансын оптик спектроскопын аргаар тодорхойлсон.
- Фемтосекундийн лазерын цацрагаар лити фторын талстыг шарах туршилтын үр дүнд гарсан таамаглалуудыг хялбаршуулах замаар филаментийн хүрээлэн буй орчинтойгоо дулааны диффузэд орох үзэгдлийг тооцооллын аргаар тодорхойлсон.
- Лазерын импульсийн үйлчлэлээр хатуу биетэд плазмын нягт өсөх явцын математик загварчлалыг олон фотонт туннелийн ионжилт болон лавины ионжилтын тохиолдлуудад тодорхойлсон.

Уг төслийн үр дүнгүүд нь цаашид энэ төрлийн судалгааг гүнзгийрүүлэн мэдээллийг нууцлан урт хугацаанд тогтвортой хадгалах ажлын эхлэл болох юм.

Түлхүүр үг: фемтосекунд, лазер, импульс, филаментац, люминесценц, микроскоп, лити фторын талст.

Гүйцэтгэгчдийн нэрсийн жагсаалт

(овог нэр, эрдмийн зэрэг, цол, албан тушаал)

1. С.Энхбат – доктор (Sc.D), Академич, ЭШТА
2. О.Бөхцоож – доктор (Ph.D.)
3. Б.Зандан – ЭШДэдА, аспирант
4. Б.Наранбат – ЭШДэдА, аспирант
5. Ц.Батцэнгүүн – ЭШДадаА, магистрант
6. Н.Наранцэцэг – ЭШ-ний туслах ажилтан

Төслийн үр дүнгийн даалгавар

/техникийн даалгавар/

№	Төслөөр бий болох үр дүн	Тоо хэмжээ	Үр дүнгийн үзүүлэлт	Үр дүнг хүлээлгэн өгөх хугацаа (он, сар)
1	Лазерын цацаргаар шарагдсан талстын спектрийн болон люминесценцийн кинетикийн судалгаа	1	ЭШ-ний өгүүлэл (гадаадад)	2018 оны 12 сар
2	Филаментацийн горимд эрчим ихтэй фемтосекундийн лазерын импульсээр шарсан LiF:Mg,Ti диэлектрик талстуудын дулааны өдөөлттэй люминесценцийн судалгаа. Шингээдсэн энергийн хэмжээний үнэлгээ.	1	ЭШ-ний өгүүлэл (дотоодод)	2019 оны 12 сар
3	Судалж буй материалуудыг хэрэглэх боломжийг судлах, лазерын шинэ технологийн физик үндэслэлийг гаргах.	1	ЭШ-ний өгүүлэл (гадаадад)	2020 оны 12 сар
4	Төслийн эцсийн тайлан бичих хүлээлгэн өгөх.	1	Эцсийн тайлан	2020 оны 12 сар

Удиртгал

Дэлхий технологийн шинэ эриний босгонд тулж ирээд байна. Үүний нэг илрэл нь лазер ашиглан төрөл бүрийн материалын шинж чанарын судалгаа хийх тэр дундаа лазерын цацрагийн хэт богино импульсүүдийг ашигласан материалын шинж чанарын судалгаанууд зонхилж байна. Лазерын технологи нь ШУ-ы тайлагдаагүй байгаа материалын олон шинж чанарын талаарх ойлголтуудыг илрүүлэхийн зэрэгцээ өмнө нь тодорхойлогдсон ч хараахан хэрэгжүүлэх боломж нь бүрдээгүй байсан технологиудыг хэрэглээнд нэвтрэхэд ихээхэн түлхэц болж байна.

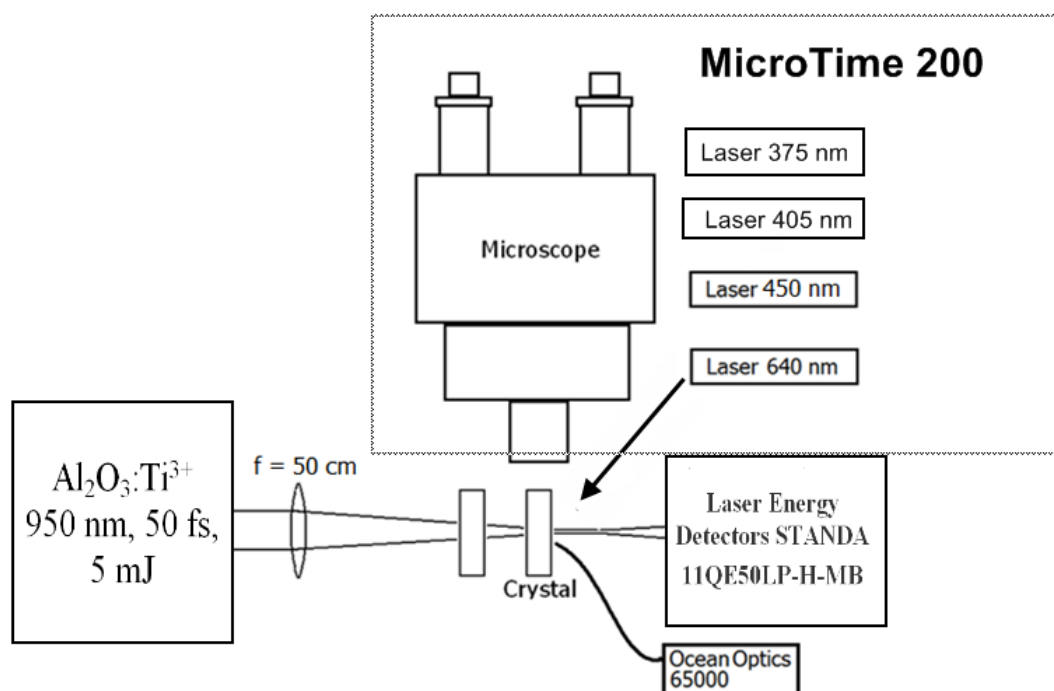
Иймээс лазерын хэт богино импульсийн хатуу биеттэй харилцан үйлчлэлд орох механизм, тухай биетийн шинж чанарын өөрчлөлтийг судлах нь ихээхэн чухал асуудлуудын нэг болоод байгааг дэхийн олон оронд хийгдэж буй энэ төрлийн ижил төстэй судалгаанууд илтгэж байна.

Уг төслийн хүрээнд ОХУ-ын ШУА-ийн Сибирийн салбарын Лазерын физикийн хүрээлэнгийн Эрхүү хот дахь салбар хүрээлэнтэй хамтран Фемтосекундийн лазерын импульс лити фторын талсттай харилцан үйлчлэлд орох механизмын физик шинж чанарын судалгааг хийж гүйцэтгэсэн.

Хамтарсан төслийн тайлангийн материал нь удиртгал, таван хэсгээс тогтох судалгааны үндсэн агуулга, дүгнэлт, төслийн үр дүнгээр хэвлэгдсэн бүтээлийн жагсаалт, хавсралт зэрэг хэсгүүдээс тогтоно.

Лазерын цацрагаар шарагдсан лити фторын талстын люминесценцийн спектрийн болон кинетик шинж чанарын судалгаа

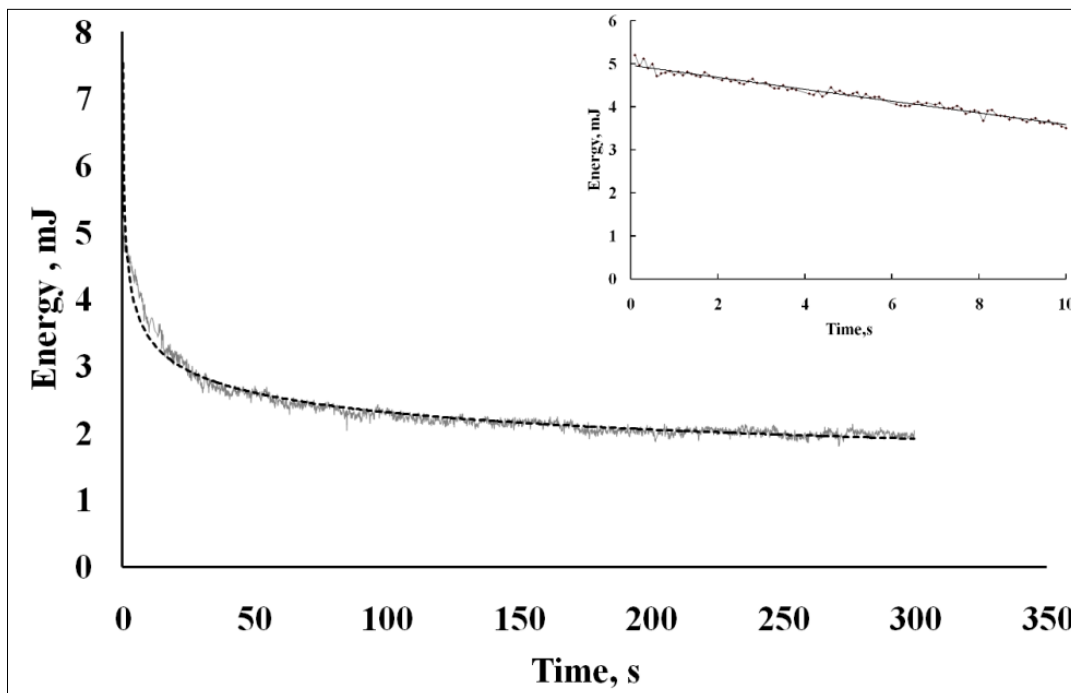
Фемтосекундийн лазерын цацрагаар кристаллыг шарах туршилтууд нь ойролцоогоор 5 мДж энергитэй, 10 Гц давтамжтай 50 фс импульсийг үүсгэх титан-сафирын лазер бүхий төхөөрөмж дээр 500 мм фокусын зайтай линзийн ашиглан гүйцэтгэсэн. Лазерын цацрагийн спектрийн хамгийн их долгионы урт нь 950 нм байна (Зураг 1).



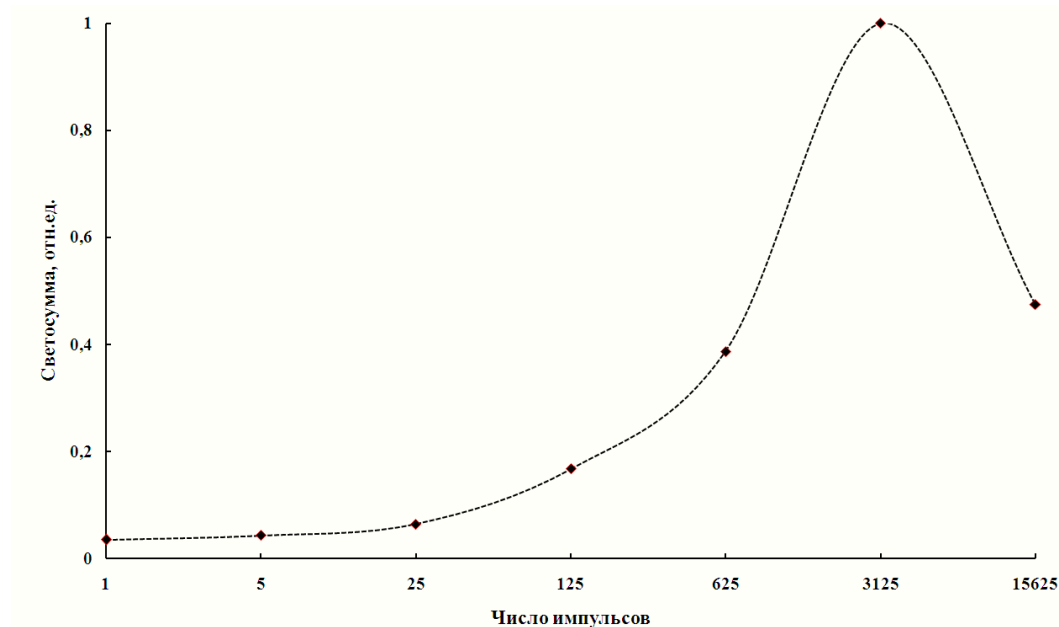
Зураг 1. Фемтосекундийн лазерын цацрагаар талстыг шарах, үүссэн гажгийн люминесценцийн спектрийн болон кинетик шинж чанарыг судлах туршилтын төхөөрөмжийн бүдүүвч зураг.

Туршилтуудад өдөөгдсөн лазерын цацрагийн импульсийг их хэмжээний фокусын зайтай линзээр фокуслах үед бага апертуртай фокуслах нөхцөлтэй нийцсэн гэрэл дээжтэй харилцан үйлчлэх горимыг ашигласан. Шарах үед судлагдаж буй дээжийг линзийн геометр фокусын байршлын цэгийн урд 40 мм зайд байрлуулсан бөгөөд ингэснээр ууршилт, лазерын эвдрэл, дээжийг гэмтээхээс зайлс хийх боломжтой болсон. Дээжээр өнгөрөх лазерын импульсийн энергийг STANDA - 11QE50LP-H-MB лазерын энергийн детектор ашиглан бүртгэсэн.

Дээжээр өнгөрөх лазерын цацрагийн бүрэн энерги нь импульсийн тоогоор тодорхойлогдоно (Зураг 2).

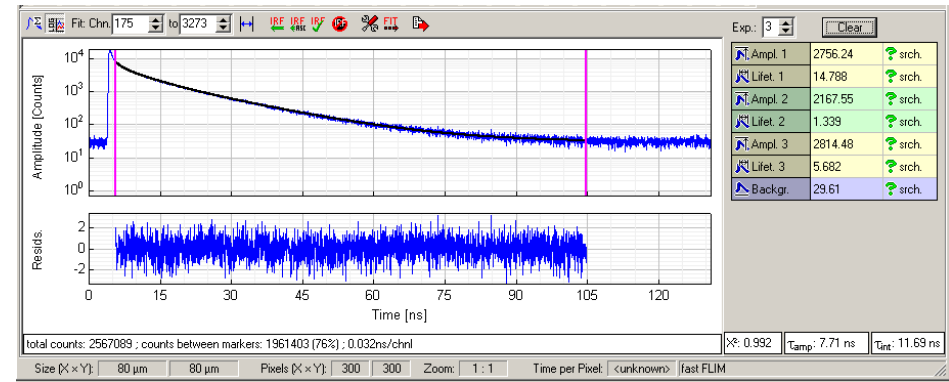
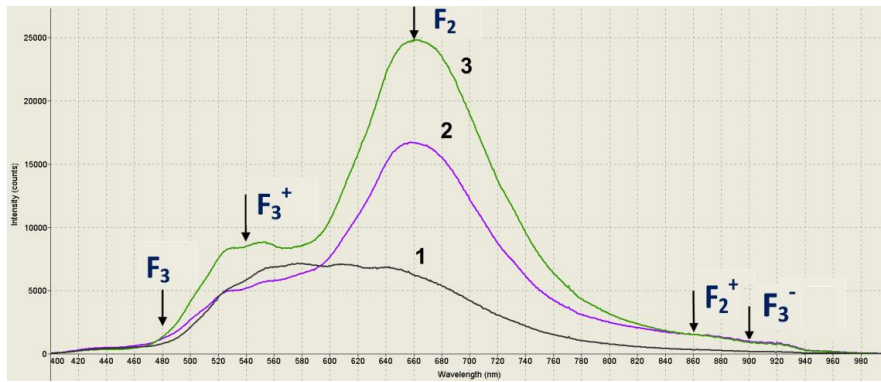


Зураг 2. Шарах явцад талстаас гарч бүртгэгдсэн лазерын импульсийн энерги хугацааны хамаарал. Шаралтын эхний 10 секундэд (100 импульс) импульсийн энергийн өөрчлөлт.

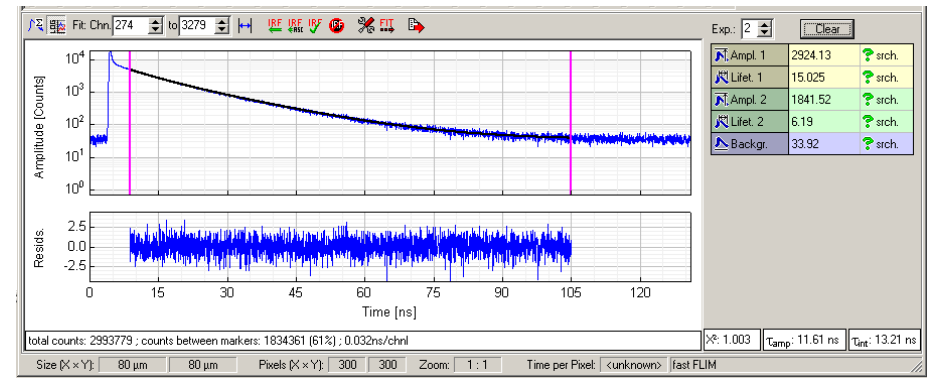
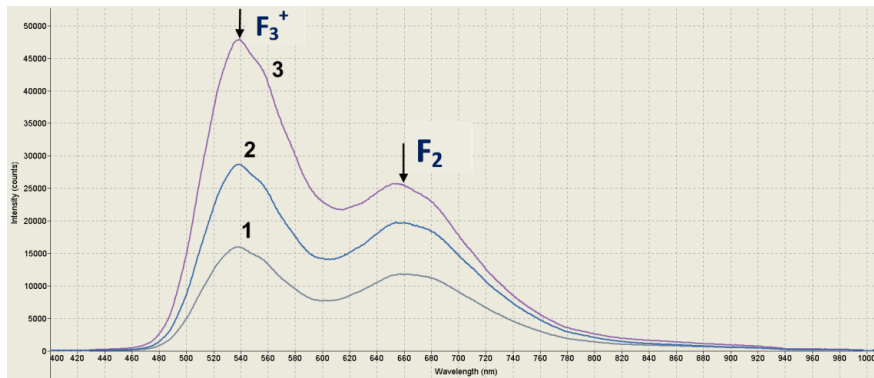


Зураг: 3. Талстаас цацрах титан-сафирын гэрлийн нийлбэр утгыг шарах лазерын импульсийн тооноос хамаарсан хамаарал. Дээжийг $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 400^{\circ}\text{C}$ температурын завсарт тогтмол $0.25^{\circ}\text{C}/\text{c}$ хурдтайгаар шатаасан.

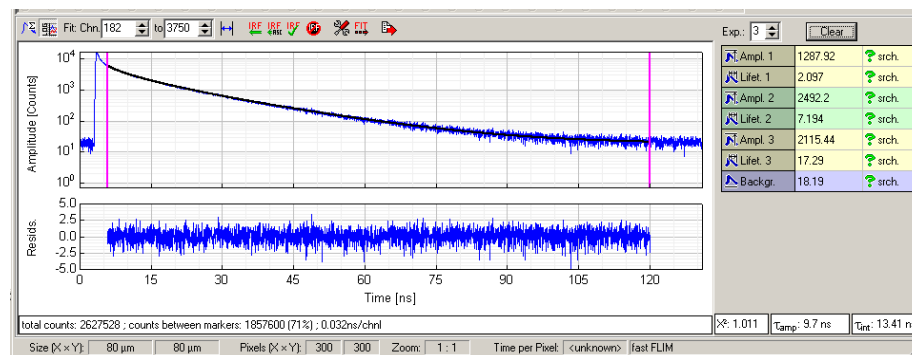
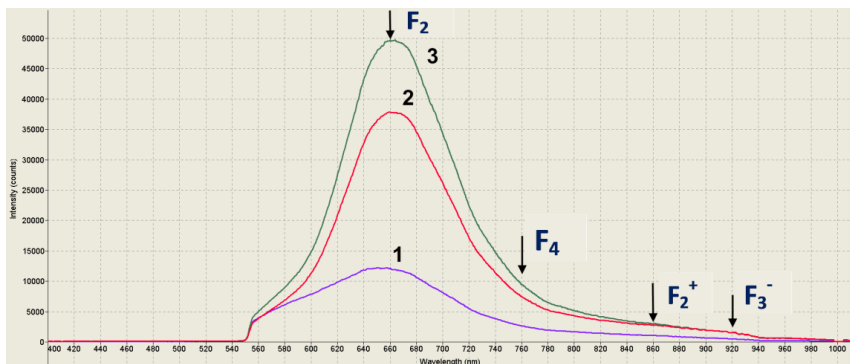
Шаралтын эхний 1-2 секундэд (10-20 импульс) талстад шингэсэн лазерын импульсийн энергийн хэмжээ нь ач холбогдол багатай. Учир нь электрон нүхний хосууд үүсэх процесс, анионы экзитоны хэлбэршилтэй электрон, нүхний рекомбинац, Френкелийн гажиг үүсгэх экситонуудын задрал, саармаг болон ионжсон Френкелийн гажгийн хөдөлгөөнт бүрэлдэхүүн хэсгүүдийн дараагийн шилжилттэй тэдгээрийн цэнэг солилцоо, бөөгнөрөх процесс хараахан явагдаагүй байна. Цуварсан импульсийн тоо (шаралтын хугацаа) нэмэгдэхийн хэрээр цэнэг солилцох, өнгөний бөөгнөрсөн төвүүд үүсэхтэй зэрэгцэн явагдах сул орон зай болон F_2^+ хөдөлгөөнт төвийн оролцоотойгоор бөөгнөрөх процессууд эхэлдэг. Өнгөний төвүүдийн концентрац ихсэх тусам шингээлт нэмэгдэж, талстын гаралтад бүртгэгдсэн лазерын импульсийн энергийн хэмжээ буурдаг. Шарагдсан талстаас цацрах дулаанаар өдөөгдсөн люминесценциин гэрлийн нийлбэр утга нь лазерын импульсийн тоо ихсэхтэй хамт эхлээд өсөж, хамгийн их утгадаа хүрмэгц эрчим ихтэй лазерын нөлөөнөөс үүсэх өнгөний төвийн задрал, дотоод температурын өсөлт болон филаментийн нэвтэрч өнгөрөх байрлалд талстын боломжит эвдрэлийн процессоос шалтгаалж цаашаа буурна (Зураг 4).



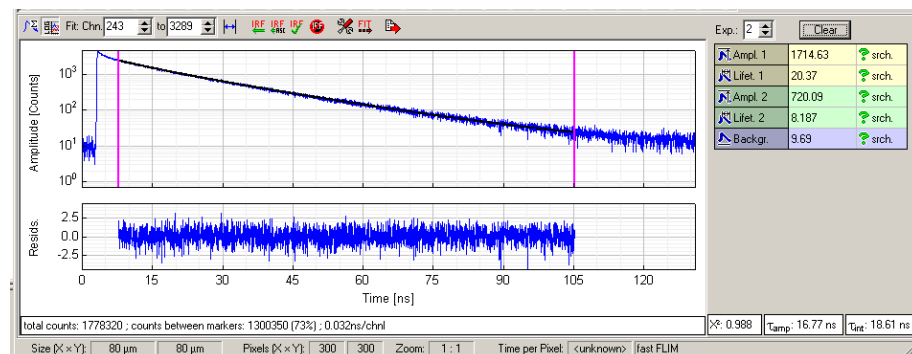
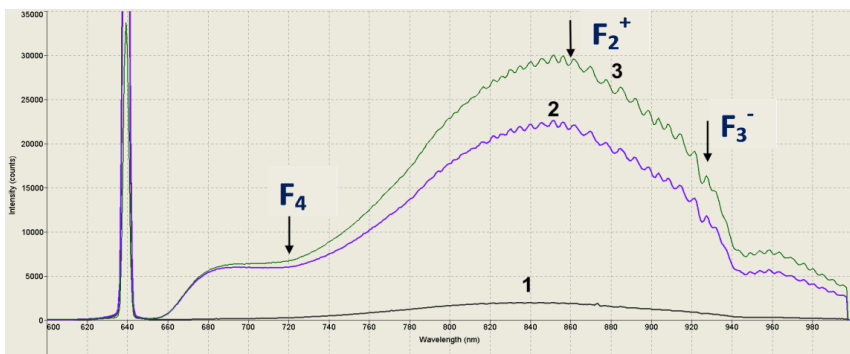
a)



b)



б)



г)

Зураг 4. Фемтосекундийн лазерын импульсийн 5 (мурий 1), 625 (мурий 2) болон 3125 (мурий 3) цуваагаар өдөөгдсөн үеийн бүтцийн гажгийн люминесценцийн спектр (зүүн тал); люминесценци нь (а) 375нм, (б) 405нм, (в) 532нм болон (г) 640нм долгионы урттай пикосекундийн лазерын импульсээр өдөөгдсөн үеийн унтралтын шинж чанарын муруй (баруун тал).

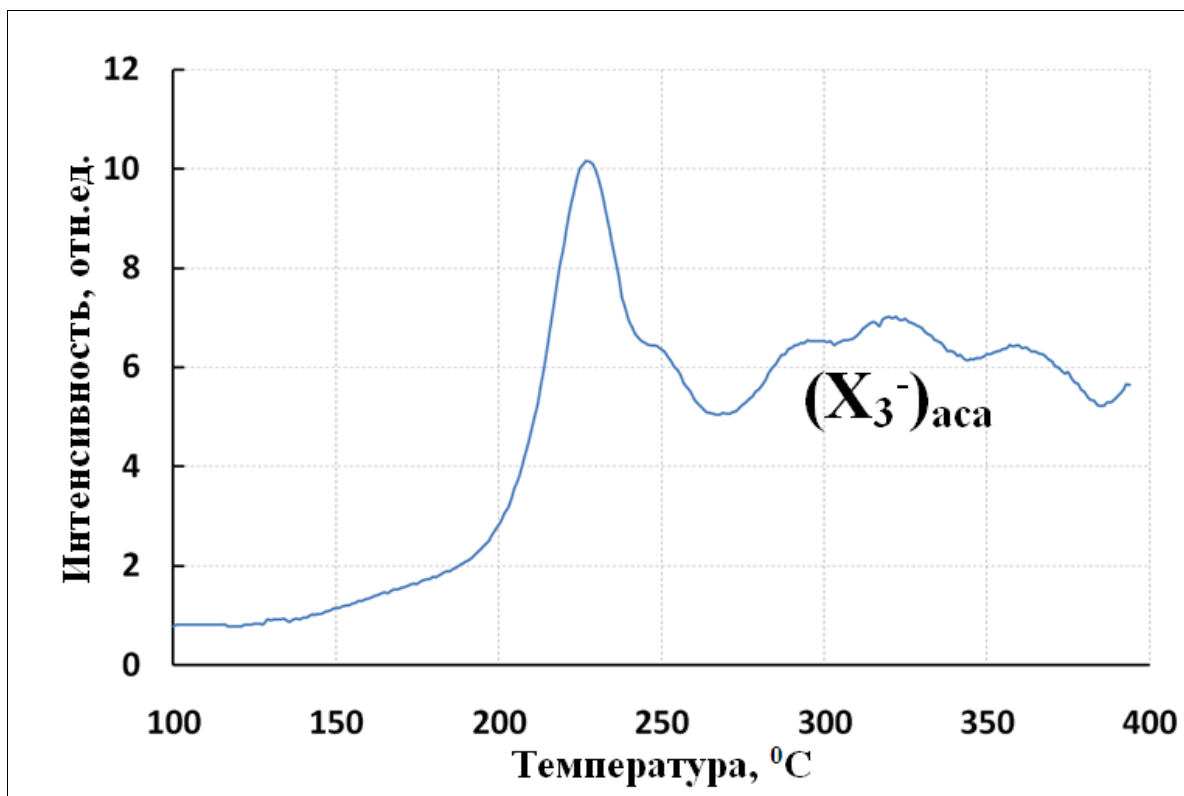
Фемтосекундийн лазераар үүсгэсэн өнгөний төвүүдийн бүрэн нэршил, тэдгээрийн спектр-кинетик шинж чанарыг хүснэгт №1-д үзүүлэв.

Хүснэгт №1

Цуваан дахь импульсийн тоо	Люминесценцийн гажгийн төрөл ба тэдгээрийн шинж чанар											
	F_2		F_3^+		F_2^+		F_3^-		F_3		F_4	
	Люминесценцийн хамгийн их зурвас, (нм)	Унтралтын хугацаа, (нс)	Люминесценцийн хамгийн их зурвас, (нм)	Унтралтын хугацаа, (нс)	Люминесценцийн хамгийн их зурвас, (нм)	Унтралтын хугацаа, (нс)	Люминесценцийн хамгийн их зурвас, (нм)	Унтралтын хугацаа, (нс)	Люминесценцийн их зурвас, (нм)	Унтралтын хугацаа, (нс)	Люминесценцийн их зурвас, (нм)	Унтралтын хугацаа, (нс)
5	660	15	540	7	860	20	үгүй	-	үгүй	-	үгүй	-
625	660	15	540	7	860	20	820	7-8	420-480	-	700-800	
3125	660	15	540	6	680	20	820	7-8	420-480	-	700-800	-

Дээр үзүүлсэн үр дүнгээс таван фемтосекундийн импульсийн цуваагаар шарагдсан дээжийн хувьд люминесценцийн спектрт $\lambda = 680\text{нм}$ хамгийн их долгионы урттай F_2 өнгөний төв болон $\lambda = 540\text{нм}$ хамгийн их долгионы урттай F_3^+ төвүүдийн лити фторын кристаллын цацаргалтын үед өнгө үүсгэх шинж чанар ажиглагдаж байна. Лазерын цацрагаар шарагдсан лити фторын дээжид 15нс болон 6.8нс люминесценцийн унтралтын хугацааны хэмжигдсэн утга нь цацаргалтаар өнгө оруулсан талстууд дахь F_2 болон F_3^+ төвүүдийн унтралтын хугацааны шинж чанарын утга болох 16нс ба 8нс -тэй харгалзан хэмжилтийн алдааны хүрээнд байна. Өгөгдсөн төвүүдийн хувьд 17нс унтралтын хугацааны шинж чанартай F_2^+ тогтворжсон төвүүдийн цацаргалтын зурвас нь $\lambda_g = 640\text{нм}$ пикосекундийн лазерын импульсээр өдөөх үеийн люминесценцийн спектрт ажиглагдаж байна. 625 болон 3125 фемтосекундийн импульсийн цуваагаар шарагдсан дээжийн хувьд цацаргалтыг ихэсгэхэд F_2^+ өнгөний төвүүдийн

үлдэгдэл концентрац ихэсдэг. Мөн түүнчлэн F_3 (R), F_3^- болон F_4 (N) илүү цогц бөөгнөрлийн төвүүд ажиглагдана.

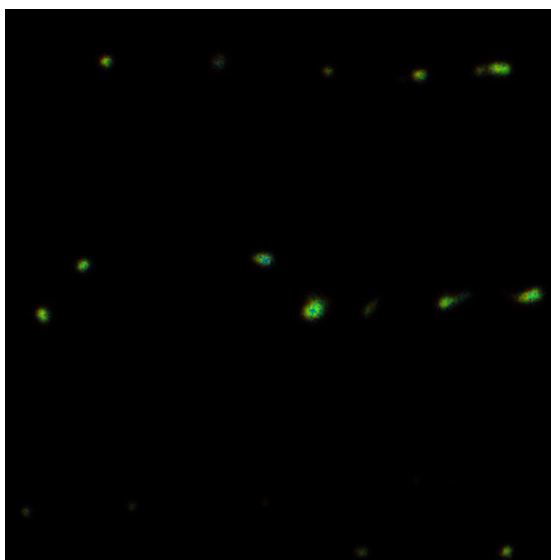


Зураг 5. 5мДж энергитэй лазерын цацрагаар шарагдсан $LiF:Mg,Ti$ дозиметрийн талстын дулааны цацаргалтын мурий (нэг импульс).

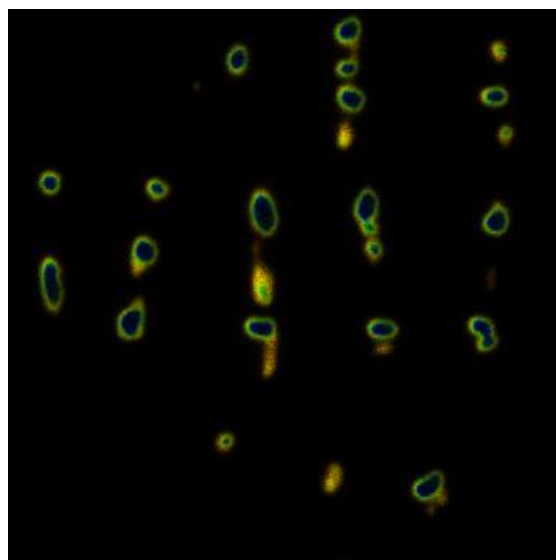
Төвүүдийн нэгдлийн эцсийн бүтээгдэхүүн нь 2 анион болон 1 катионы хоосон орон зайд байрласан молекуляр галлоид ионууд болох X_3^- нүх-интерстициал төлөвийн тогтвортой гажгууд бөгөөд эдгээр гажгуудын үүсэх бүтээмж нь дулаанаар өдөөгдсөн люминесценцийн мурий дахь өндөр температурын оргил цэгүүдээр үнэлэгддэг.

Талстад үүссэн гажгийн топологийн судалгаа

Талстад үүссэн гажгийн топологийн болон лазерын цацрагаар шарагдсан дээжийн люминесценцийн судалгаанд isoQuant GmbH фирмийн MicroTime 200 маркын пикосекундийн хугацааны нарийвчлалтай, өндөр мэдрэг чадвартай, зэрэгцээ фокустой, люминесценцийн микроскопыг ашигласан. Энэхүү микроскоп нь лазерын цацрагаар үүсгэсэн гажгийн концентрацын тууш болон хөндлөн түгэлтийг бүртгэдэг ба шарагдсан объектын доторх микро объектын зураглалыг 10нм алхамтайгаар скан хийн гаргадаг.

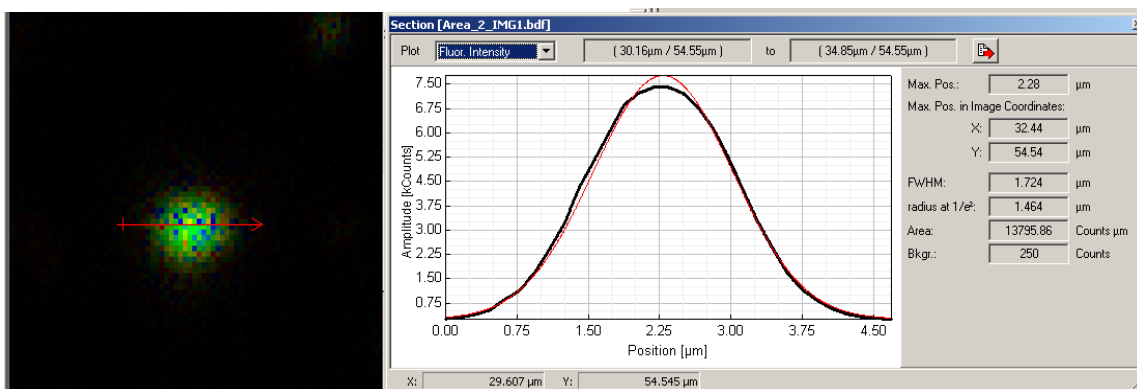


5 импульс

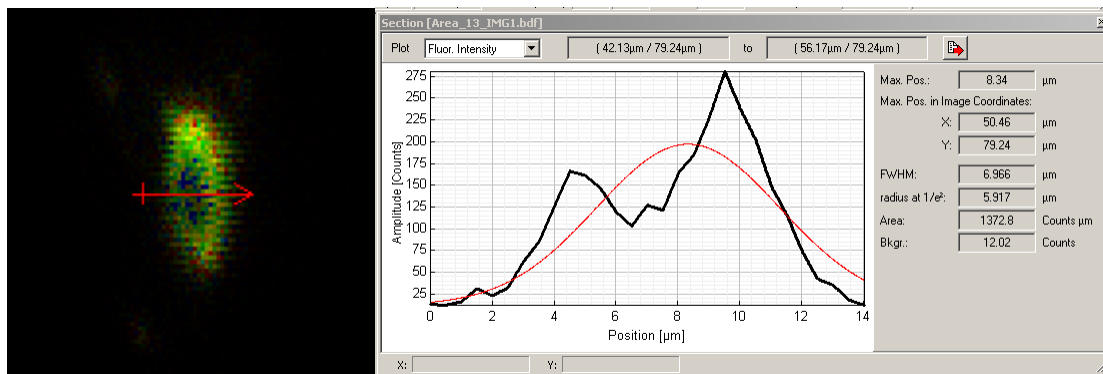


1000 импульс

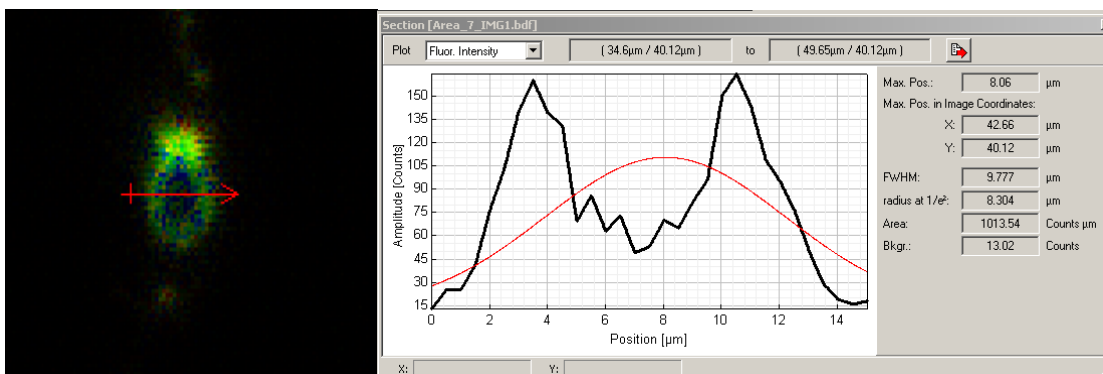
Зураг 6. Лазерын цацрагийн үйлчлэл дор үүссэн өнгөний төвүүдийн люминесценцийн эрчмийн хөндлөн түгэлт (MicroTime 200 микроскопийн 80×80мкм талбайтай скан).



1 импульс



1000 импульс

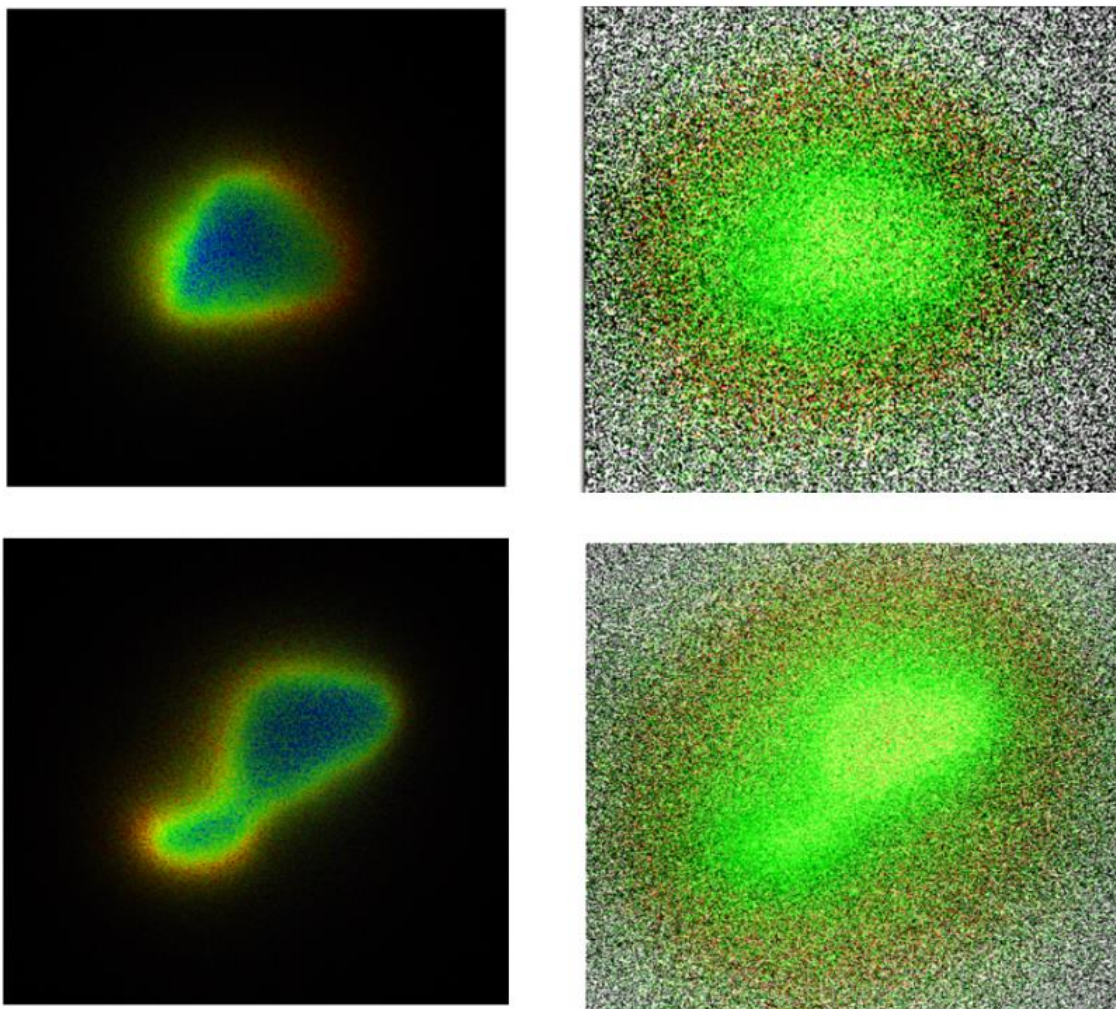


3000 импульс

Зураг 7. Лазерын өдөөх импульсийн тоо 1-3000 хүртэл цуваагаар нэмэгдүүлэх үеийн мөрийн хөндлөн огтлолын өөрчлөлтийн динамик (MicroTime 200 микроскоп). Лазерын импульсийн цувааны тоо ихсэх тусам мөрийн хөндлөн огтлолын хэмжээ нэмэгдэж байна.

Фемтосекундийн лазерын цацрагаар үүсгэсэн люминесценцийн сувгууд дахь хөндлөн огтлолд үүсэх туйлшралын төвшинг ашиглан өнгөний төвүүдийн тархалтыг судлахад зориулж люминесценцийн туйлшруулагч микроскопын аргыг санал болгож байна. Тухайн аргын туршилтын баталгаажуулалтыг MicroTime 200 микроскопоор хийсэн. SPAD1 болон SPAD2 детекторуудыг ашиглан хоёр сувгийн люминесценцийг бүртгэх схемийг гүйцэтгэсэн. Энд цацрал нь туйлшруулагчийн тусламжтай өдөөсөн цацрагаас хамаарч туйлширсан перпендикуляр болон параллель гэсэн хоёр хэсэгт хуваагдана. Үүний үр дүнд бид люминесценцийн туйлшралын зэргийн түгэлттэй тохирох дүрсийг бүтээх боловсруулах процессын гүйцэтгэснээр хоёр зургийг гарган авсан.

Бид лазерын цацрагийн өөрөө фокуслах ба фламентацийн горимд фемтосекундийн 1000 импульсийн цуваагаар шарагдсан LiF монокристаллыг судалсан. Энэхүү туршилтад өдөөх цацрагийн цахилгаан орны хүчлэгийн вектор E нь кубийн диагоналийн дагуу чиглэдэг (кристаллографийн тэнхлэг C_4) өөрөөр хэлбэл тэнхлэгтэй 45° үүсгэнэ. Люминесценцийн ажиглалтын өгөгдсөн хэлбэрийн хувьд судлагдаж буй төвийн хэлбэр бүрийн туйлшралын зэргийн утга нь өөрийн тогтсон утгатай байх болно. Энэхүү загварыг зэрэгцээ фокустой люминесценцийн сканердах микроскопын туйлшруулах аргаар туршилтаар баталгаажуулсан болно



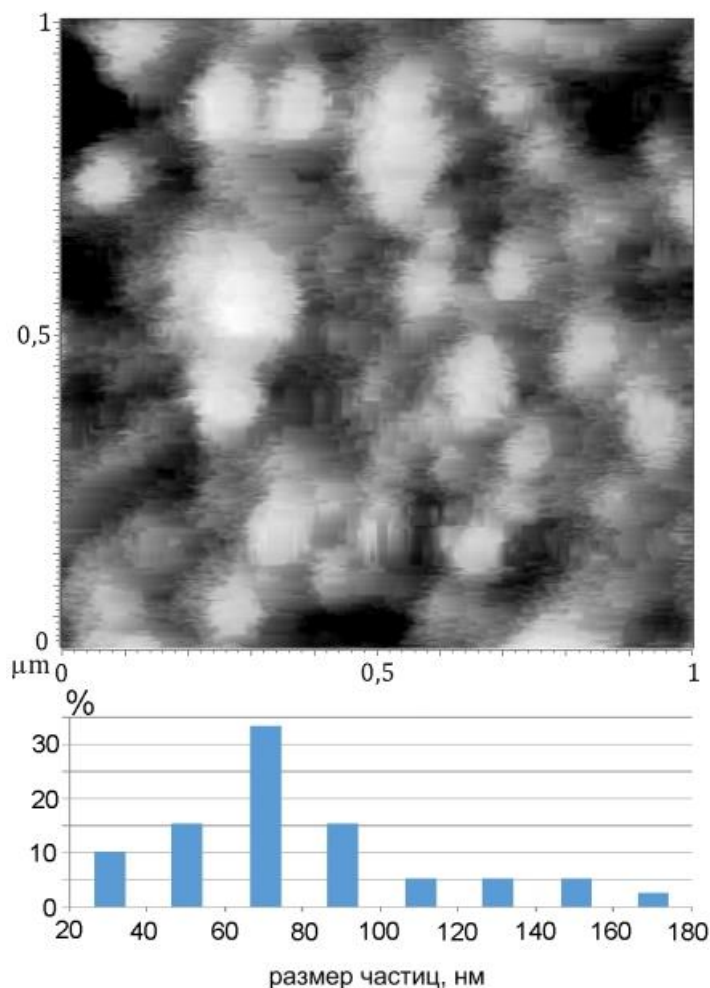
Зураг 8. LiF -н монокристалл дахь филиментийн мөрийн хөндлөн огтлолын зургууд. Зүүн талд - унтралтын хугацаанаас хамаарсан түгэлт, баруун талд - туйлшралын зэргээс хамаарсан түгэлт.

Зураг 8-д филаментын мөрийн хөндлөн огтлолын зургийг үзүүлэв, баруун талд туйлшралын зэргээс хамаарсан түгэлт. Ногоон өнгө нь 0.33 туйлшралын зэргийн утгатай, 8нс унтралтын хугацаатай өнгөний F_3^+ төв юм. Улаан нь 0.66 туйлшралын зэргийн утгатай, 16нс унтралтын хугацаатай өнгөний F_2 төв юм. Төв хэсэгт коллоид литийн бөөмийг агуулах торын эвдэрсэн бүс байрлана.

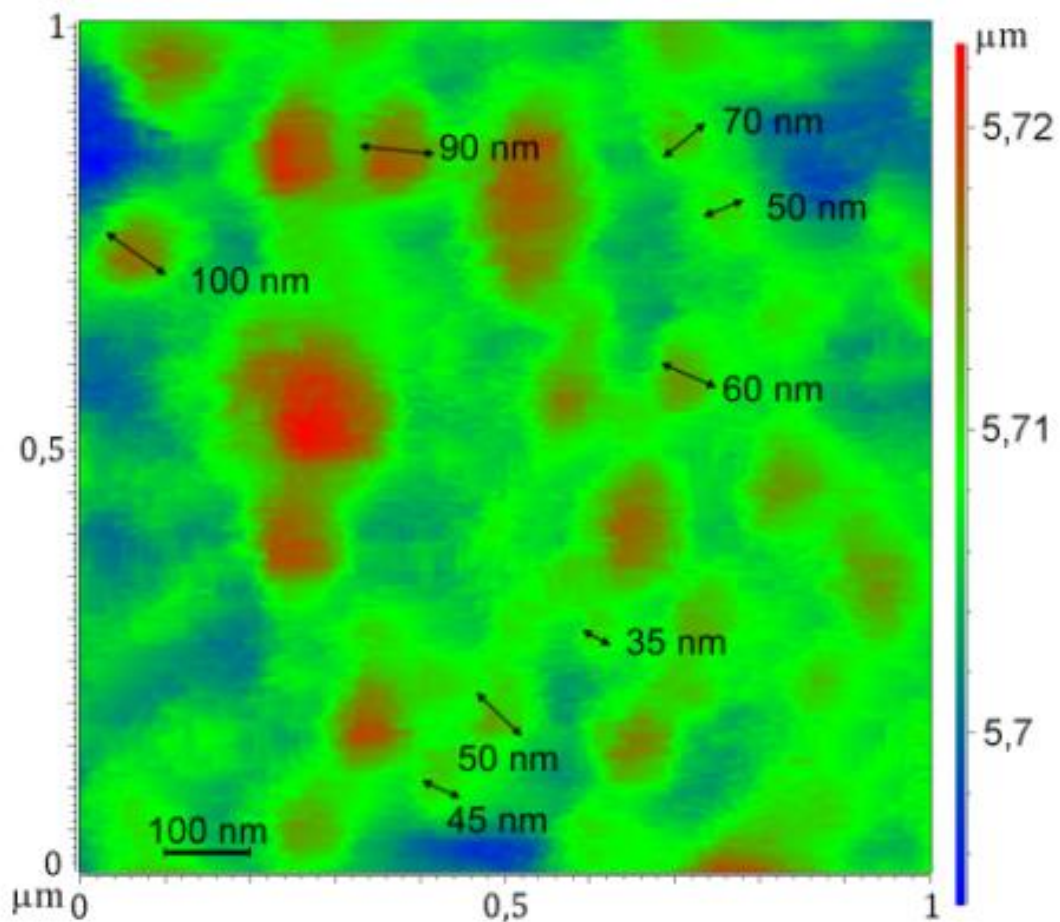
Лити фторын талст дотуур фемтосекундийн лазерын импульс явж өнгөрсний дараа агрегат төвүүд болон бусад урвалын эцсийн бүтээгдэхүүний мөрийн хөндлөн огтлолын зүсэлт дэх түгэлтийн орон зайн статистик загварыг санал болгодог. Гамма болон рентген цацрагаар шарагдсан кристаллын шинж чанар болох гажгийн нэгэн төрлийн түгэлтээс ялгаатай нь фемтосекундийн лазераар шарах үед өнгөний төвийн болон бусад тогтвортой гажгийн түгэлт нь нэгэн төрлийн бус байна. Лазерын цацрагийн филаментацийн үр дүнд хэлбэржсэн мөрийн төвд ойртох тусам гажгийн төрөл бүрийн хэлбэрүүдийн концентрац өөрчлөгдөж байна. Тухайлбал F тогтвортой төвүүд голчлон мөрийн ирмэг хэсэгт, түүний дотуур голчлон F_2 өнгөний төвтэй бүс, филаментын мөрийн төвд ойртох тусам анион орон зайн концентрац ихтэй F_3^+ төвүүд голлон байрлана. Төвд нь литийн коллоид бөөмүүд бүхий торын эвдэрсэн бүс байрлана.

Лазерын цацрагаас үүдэлтэй сувгийн бичил бүтцийн судалгаа

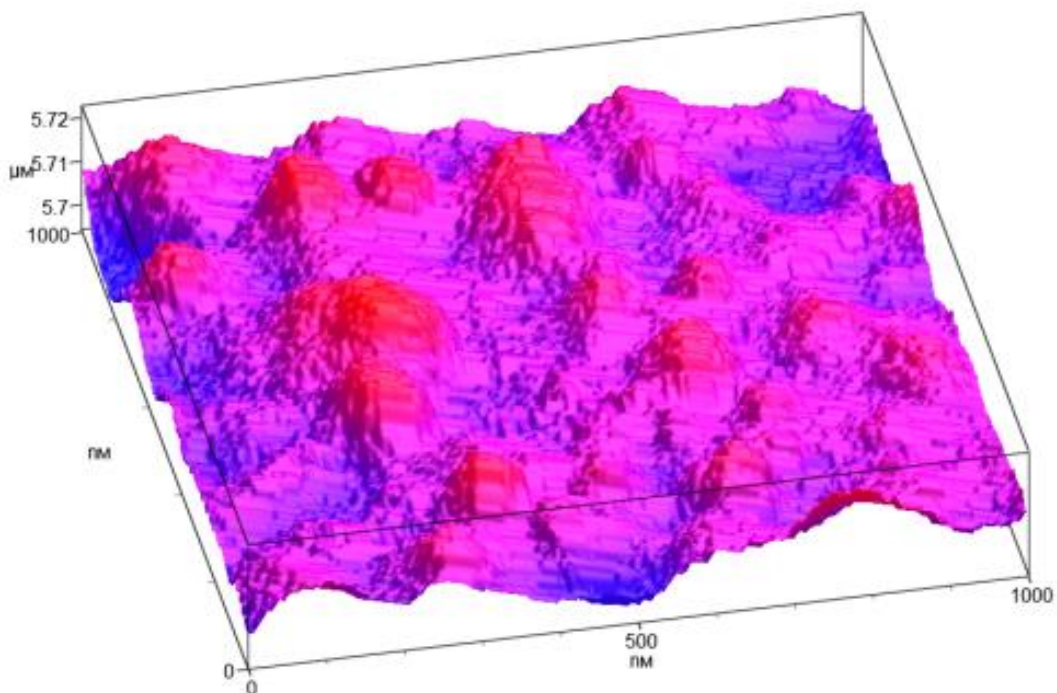
Лити фторын талст дахь фемтосекунд лазерын цацрагаас үүдэлтэй сувгийн хөндлөн огтлол дахь бичил бүтцийг судлах ажлыг Certus Light сканер микроскопоор хийв. Үндсэн горимд SPM Certus нь атомын хүчний микроскопоор ажилладаг. Судалгааны хувьд хагас контактын сканердах горимыг ашигласан болно. Зураг 4-6-д үзүүлсэн үр дүнгүүд нь коллоид металлын нано хэсгүүдийг өөрийн фокусалт болон филаментацийн горимд фемтосекундийн хүчтэй лазерын цацрагаар ихэвчлэн экситоник гажиг үүсэх механизмаар синтезлэх үндсэн боломжийг харуулж байна.



Зураг 9. 3000 фемтосекунд лазерын импульсийн цуваагаар өдөөгдсөн сувгийн хөндлөн огтлол дахь коллоид литийн нано хэсгүүдийн орон зайн болон статистикийн тархалтын зураг (Certus Light сканер микроскоп).

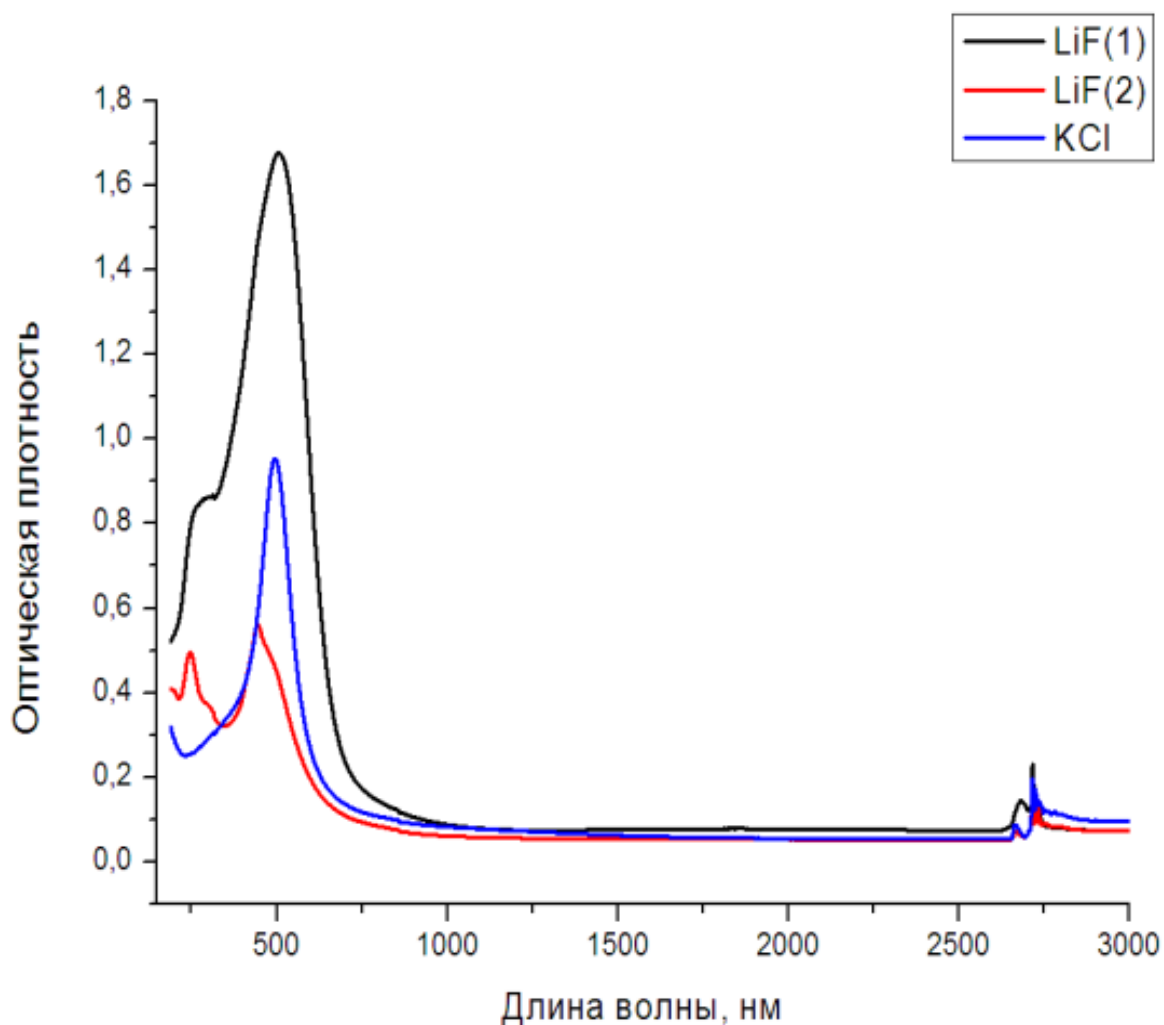


Зураг 10. Коллоид литийн нано хэсгүүдийн хэмжээсийн тархалт (фазын хөндлөн огтлолыг өнгөөр ялгав).



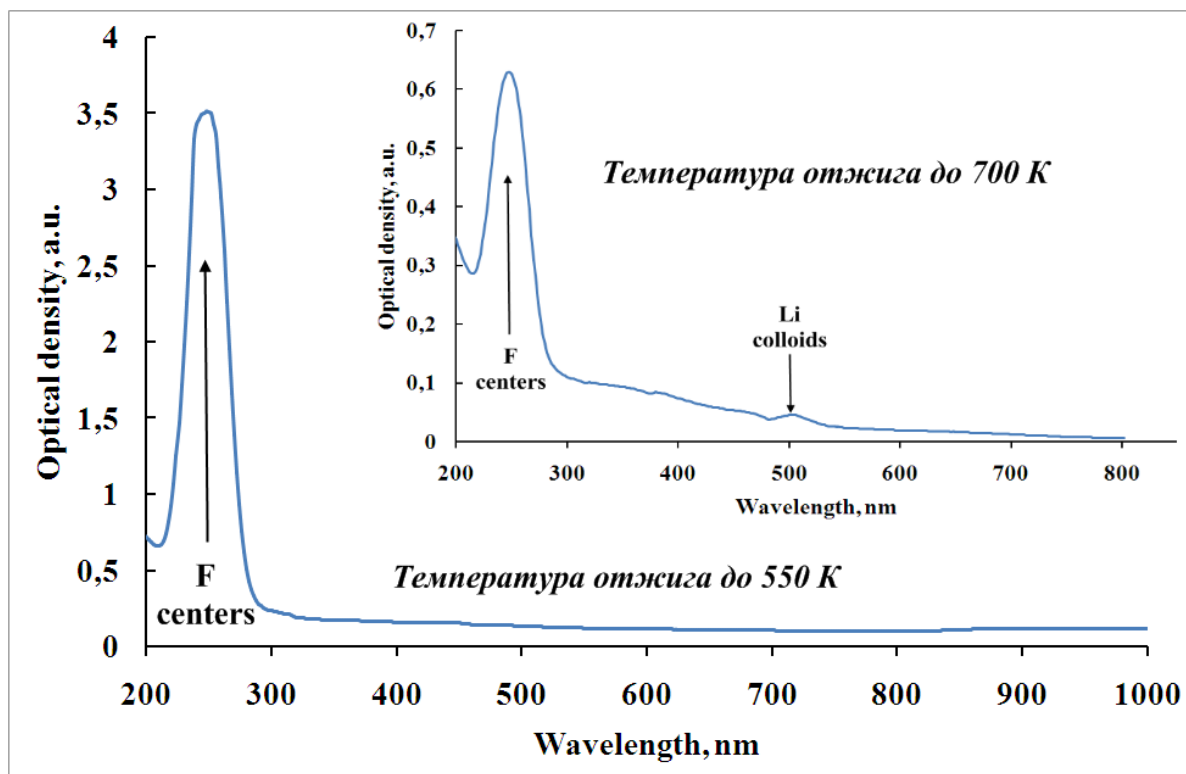
Зураг 11. Гадаргуугийн рельеф (XYZ координат дахь 3D зураг).

Атомын хүчний микроскопыг ашиглахаас гадна коллоид литийн нано хэсгүүдийн үүсэх процессыг плазмон-резонансын оптик спектроскопын аргаар 500–510нм бүсэд шингээлтийн судлыг бүртгэв. Лити фторын талстыг фемтосекундийн лазерыг хүчтэй цацрагаар идэвхжүүлэх үед коагуляци болон металлын нано хэсгүүдийн үүсэх механизмыг судлахдаа үр дүнг энэ төрлийн талстыг Li^+ ионжуулах явцад болон $10^6 P$ гамма цацраг туяагаар урьдчилан идэвхжүүлсэн талстын дулааны боловсруулалтын үед олж авсан өгөгдлүүдтэй харьцуулсан болно (Зураг 12,13).



Зураг 12. Li^+ ба KCl талстын шингээлтийн спектрууд (1) $1.5 \cdot 10^{15}$ ба (2) $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² нэвчилттэй Li^+ ионоор идэвхжүүлсэн.

Дээрх өгөгдлүүдийг Li^+ суулгасан талст дахь 500–510 nm шингээлтийн судлыг литийн nano хэсгүүдийн плазмон-резонансын судал гэж тайлбарлах боломжийг олгож байна.



Зураг 13. $10^6 R$ гамма цацрагаар шарсан лити фторын талстын шингээлтийн спектрууд (дулаан боловсруулалт нь 550K ба 700K).

Плазмон-резонансын зурвасыг 5–10 nm -ээс их nano хэсгүүдэд бүртгэдэг болохыг тодорхойллоо. 550K температурт дулааны боловсруулалтад орсон лити фторын талстад шингээлтийн спектрт ажиглагдаагүй 500 nm зурвас дахь өсөлт 700K температурт анализ хийсэн талстын спектрт ажиглагдаж байгаа нь коагуляци процессод температурын үүрэг ихээхэн ач холбогдолтой болохыг харуулж байна

Филаментацийн горимд лазерын гажиг үүсэх үеийн агрегацийн болон коагуляцын процесс дахь бодисын дотоод халалтын үзүүлэх нөлөөллийн судалгаа

Туршилтын үр дүнд гарсан таамаглалуудыг хялбаршуулах замаар филаментийн хүрээлэн буй орчинтойгоо дулааны диффузэд орох үзэгдлийг тооцооллын аргаар судалж болно. Нэгдүгээрт, филаментийн урт 10–100 мкм нь судлын зузаан 2–3 мкм-ээс их байвал хялбаршуулсан загварт филаментийг хязгааргүй урттай гэж үзнэ. Хоёрдугаарт, туршилтын үр дүнгээс өнгөт төвүүдээс үүсэх мөрний хөндлөн зүсэлтийг Гауссиан-р ойролцоолдог. Иймд z тэнхлэгтэй параллель, Гауссианы хөндлөн зүсэлт бүхий хязгааргүй урт филамент үүсэх үед эхний халалтын дулааны загварчлалын асуудал, дулаан дамжууллын тэгшитгэлийн тооцооллыг бууруулдаг:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

Энд $T(x, y, t)$ – дулаан, k – дулаан дамжуулалт, c – дулаан багтаамж, ρ – нягт, анхны нөхцлийн үед:

$$T(x, y, t) = T_{\max} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right) \quad (2)$$

T_{\max} – хугацааны эхний агшин дах филаментийн төв дэх халалтын далайц үед өгөгдсөн хугацаан дах халалтын орон зайн түгэлтийг дараах функцээр илэрхийлж болно:

$$T(x, y, t) = T_{\max} \frac{r_0^2}{4at + r_0^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4at + r_0^2}\right) \quad (3)$$

Эхний зүсэлтийн өргөн хамгийн ихдээ 2 мкм-ийн хагастай байх үед судлын тэнхлэг дээрх халалт нь 1 мкс орчим хугацаанд экспоненциалаар буурдаг (LiF - ийн дулаан багтаамж нь 300 K температурт $11.3 \text{ Bm/м} \cdot K$). Энэ нь бидний ердийн туршилтуудын импульсийн давталтын үеэс 3-5 дахин бага юм. 1 минутын турш 1 кГц давтамжтай импульсийн үйлчлэлээр, 500 K температураар халаахад филаментэд хуримтлагдсан дулаан нь 1 K-ээс бага байна. Ийм дулааныг өгөхөд хугарлын индекс нь ойролцоогоор $5 \rightarrow 10$ дахин өөрчлөгдөж буй нь (термо-

оптикийн коэффициент dn/dT нь өрөөний температурт ойролцоогоор $1.710^{-5} K^{-1}$ байдаг), хугарлын индексийн Керрийн өөрчлөлттэй харьцуулахад үл анзаарагдах (10^{-3} орчим) юм. Үүний үр дүнд термо-оптикийн эффект нь лазерын импульсийн тархалтад хүчтэй нөлөөлдөггүй. Гэсэн хэдий ч материалыг богино хугацаанд олон зуун хэмээр халаах нь гажиг үүсэх нөхцөл болж болно.

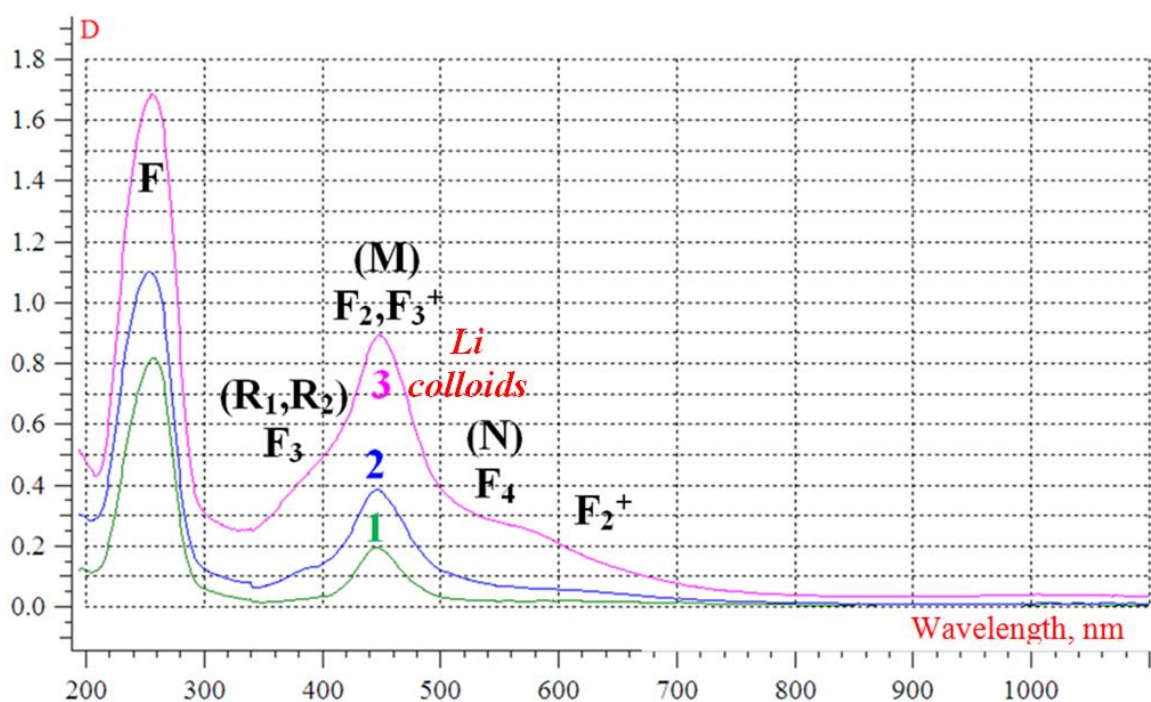
Зураг 14-т 5 мДж энергитэй дан импульсээр өдөөгдсөн сувгийн эхэн хэсгийн зургийг харуулсан бөгөөд энэ нь гажгийн люминесценцийн эрчмийн түгэлтийг илэрхийлж байна. Olimpus IX 71 микроскопоор харсан люминесценцийн цацаргалтаар үүссэн сувгийн зураг. Люминесценцийг өдөөсөн цацрагийн долгионы урт нь 450 нм. Олон филаментийн үе дэх сувгийн бүтэц нь тодорхой харагдаж байна.



Зураг 14. Дан импульсээр өдөөгдсөн сувгийн эхлэл дэх гажгуудын люминесценцийн эрчмийн түгэлтийн зураг. Сувгийн өргөн хамгийн ихдээ ~ 1,8 мм.

Зураг 15-д анионы вакансигийн үзэгдэх хугацаанаас бага хугацаанд шингээгдсэн хэсгүүдийг нэвтрүүлэх үед талстыг лазерын цацрагийн дан импульсээр шарах үеийн (шаралтын хугацаа 1 мс) шингээлтийн спектрийг үзүүлэв (муруй 1). Энэ тохиолдолд шаралтын үед агрегацийн процесс үүсээгүй, хэдэн цагийн дараагаас үүссэн. Өөрөөр хэлбэл цацаргалтын дараа. Үүний үр дүнд олон фотонуудын иончлолын улмаас фемтосекундийн лазерын цацаргалтаар үүсч буй электрон болон нүхнүүд нь өнгөний төвүүдээс олдох боломжгүй. Эдгээр нөхцөлд шаралтын дараа F_2^+ төвүүд үүсдэг эдгээр нь F төвүүдтэй нийлж F_3^+

өнгөний төвийг үүсгэдэг. Шингээлтийн спектрт зурвас нь байхгүй учир F_3 төвүүд үүсдэггүй. Түүнчлэн илүү цогц агрегат төлөв болох F_3^- төвүүд үүсдэггүй.



Зураг 15. Лазерын цацрагаар өдөөгдсөн өнгөний төвийн шингээлтийн спектр (1-1мс хугацаанд шарах үед (1 импульс), 2-3мс (3 импульс), 3-9мс (9 импульс)). Бүртгэгдсэн спектрийн зурвас дахь үүссэн өнгөний төвүүдийн төрлүүдийг харуулав.

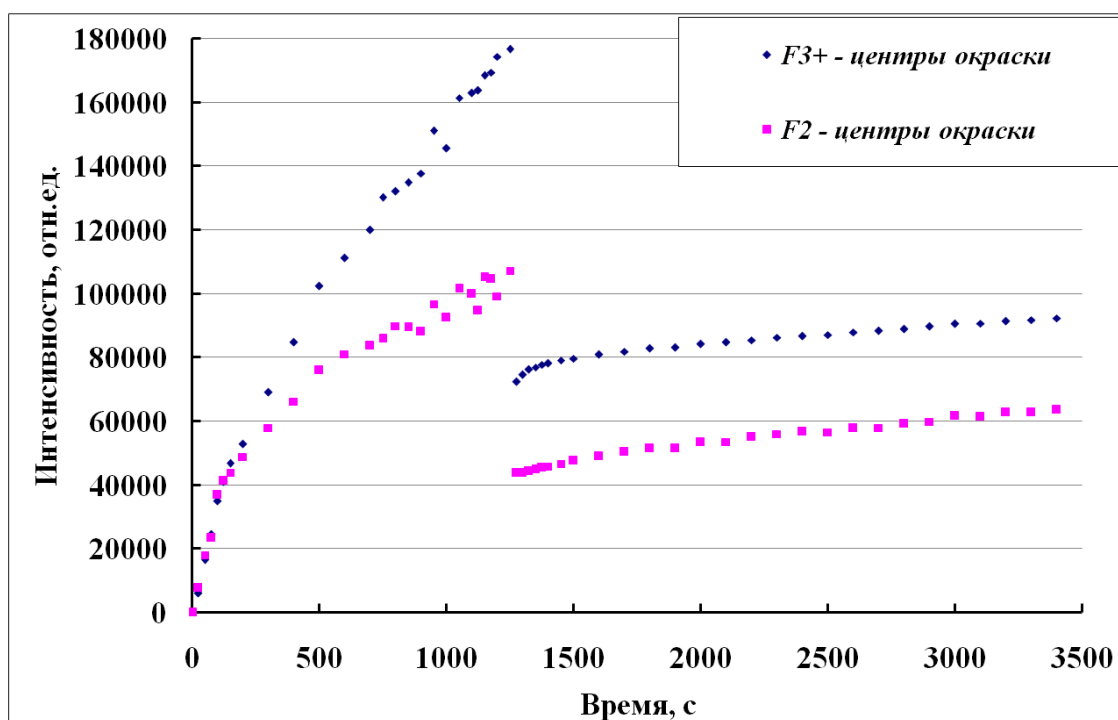
Шарах хугацаа шингээлтийн спектрт (Зураг 15 дахь 3-р муруй) 9мс байх үед (1 алхамд 9 импульс) илүү цогц агрегат $F_3(R)$, F_3^- болон $F_4(N)$ төвүүд харагдаж, F_2 өнгөний төвийн үлдэгдэл концентрац өснө. Өгөгдсөн шаралтын нөхцөлд талстын электроны бүсэд агрегацийн процесс явагддаг. Эдгээр нөхцөлд анионы ваканситай болон F_2^+ төвүүдтэй хамт F_2 болон F_3^+ төвүүд нэгддэг. Үүнээс саармаг болон сөрөг цэнэгтэй өнгөний төвүүд үүсч үр дүнд нь коллоид металл нанопартиклын тунадас үүсэх зэрэг том агрегатууд үүсдэг.

Зураг 15-д цацрагийн хэмжээг ихэсгэх тусам F , M шингээлтийн зурвасын эрчмийн харьцаа нь өөрчлөгдөж буй нь харагдаж байна. Шаралтын хугацаа нь 1мс (муруй 1) үед энэ харьцаа нь 4.3мс үед (муруй 2) – 2.75 болон 9мс (муруй 3) – 1.89. Энгийн болон агрегат өнгөний төвүүдийн шингээлтийн зурвасын эрчмийн харьцаан дахь иймэрхүү өөрчлөлтүүд нь гэрлийн филаментуудын явах

замын талстын дотоод халалтыг үүсгэдэг. Үүний үр дүнд гажгийн агрегат болон коагуляцийн процессыг хурдасгадаг.

Нэгж импульсийн үйлчлэлийн дараа филаментийн тэнхлэг дээрх бодисын халалтын эхний температурыг тооцёе. Лазерын импульс нь 10^{21} см^{-3} дамжуулалтын бүс дэх электроны плазмын хамгийн их нягтыг үүсгэсэн гэж үзье. Талстын дулаан багтаамж (LiF хувийн дулаан багтаамж $156 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$) болон электрон нүхний хосын мэдэгдэж буй энергийг ашиглан өгөгдсөн нягттай плазмын энерги нь бүгд дулаан руу хөрвөсөн бол материалын температур 500К -ээр нэмэгдэнэ гэдгийг тооцоолж болно.

Гэрлийн филаментийн тархалтын бүс дэх температурын өсөлт нь 400К хүрэх үед F_2^+ өнгөний төвийн амьдрах хугацаа нь 14мс . Энэ нь 300К температуртай байх үеэс 6 эрэмбээр бага байна. Харин анионы вакансигийн амьдрах хугацаа нь 2.5мс ба 300К температуртай байх үеэс 4 эрэмбээр бага.



Зураг 16. 20мин болон 40мин турш фемтосекундийн лазерын цацрагаар шарагдсан талстын шарах процесс дах F_2 болон F_3^+ өнгөний төвүүдийн люминесценцийн эрчмийн өөрчлөлтийн динамик (3мДж энергитэй, 50фс урттай импульс, 10Гц хэмжилтийн хугацаатай). Люминесценцийг өдөөхөөр 405нм долгионы урттай өдөөлтийн лазерыг ашигласан.

Зураг 16-д үзүүлж буй туршилтын үр дүнгээс шаралт эхэлснээс 1-2 секундийн дараа лазерын гажгийн үүсэл дэх эхний өнгөний төвүүд үүсэж байна. Энэ нь фемтосекундийн лазерын цацрагаар шарах үед F_2 төвийн концентрацаас F_3^+ өнгөний төвийн концентрац илүү хурдан өсч байгааг харуулж байна. Фемтосекундийн өдөөлт өгөхөө больсны дараа F_2 болон F_3^+ төвүүдийн үүсэл ойролцоогоор ижил хурдтай явагдаж байсан.

Лазерын импульсийн үйлчлэлээр хатуу биетэд плазмын нягт өсөх явцын математик загварчлал

5мм^2 хөндлөн огтлолын талбайтай LiF талстад 5мДж энергитэй, 50фс үргэлжлэх хугацаатай лазерын импульсийн үйлчлэлээр хатуу биетэд плазмын нягт өсөх явцын математик загварчлалын дараах хоёр тохиолдлыг гүйцэтгэсэн. Эхний тохиолдолд зөвхөн олон фотонт туннелийн ионжилтыг тооцсон бол хоёр дахь тохиолдолд лавины ионжилтыг нэмж оруулсан. Хатуу биет плазмын нягт хугацааны дагуу өсөхийг дифференциал тэгшитгэлээр бичиж болно:

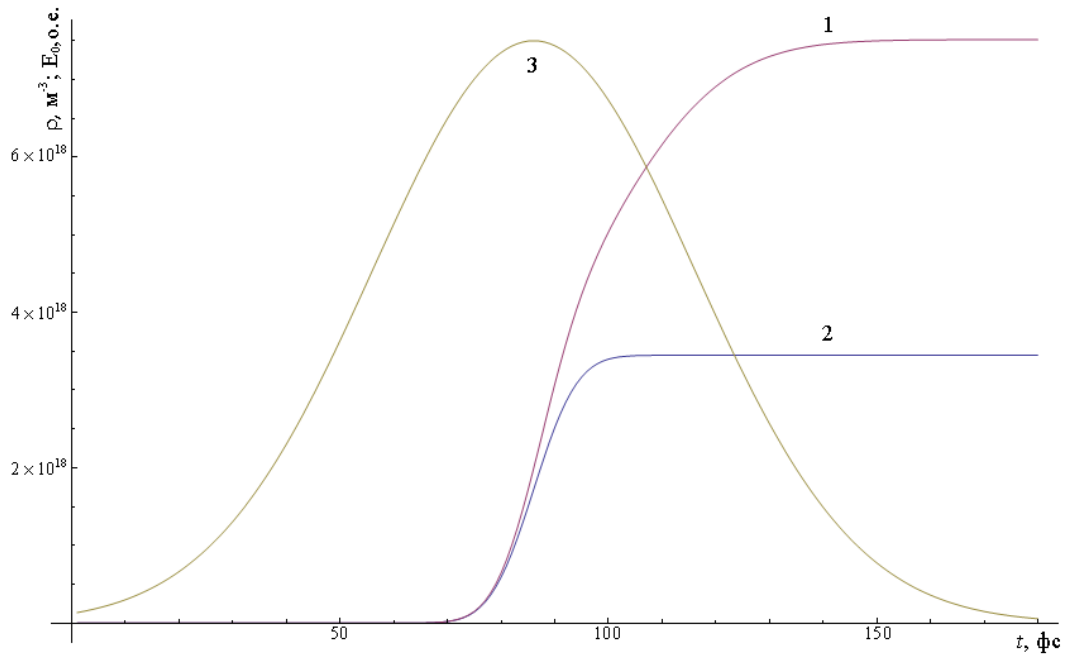
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \left(W(E) + \frac{E^2 e^2}{2U \omega_0^2 m_e \tau_c} \rho \right) \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}} \right) \quad (4)$$

Энд E – лазерын импульсийн цахилгаан орны тухайн эгшний амплитуд, ω_0 – гэрлийн орны хэлбэлзлийн гол давтамж (энэ тооцоонд вакуумд 950нм гэж тооцсон), ρ – плазмын нягт, ρ_{\max} – плазмын хамгийн их нягт ($6 \times 10^{28} \text{м}^{-3}$), e – электроны цэнэг, m_e – электроны эффектив масс, τ_c – электрон нисч өнгөрөх хугацаа (3фс), U – хориотой бүсийн өргөн (13.6эВ), $W(E)$ – Келдышийн формализмын тусламжтай тодорхойлогдож буй орчны олон фотонт туннелийн ионжилтын хурд. Импульсийн хугацааны хэлбэр нь Гауссианаар өгөгддөг:

$$E(t) = E_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \quad (5)$$

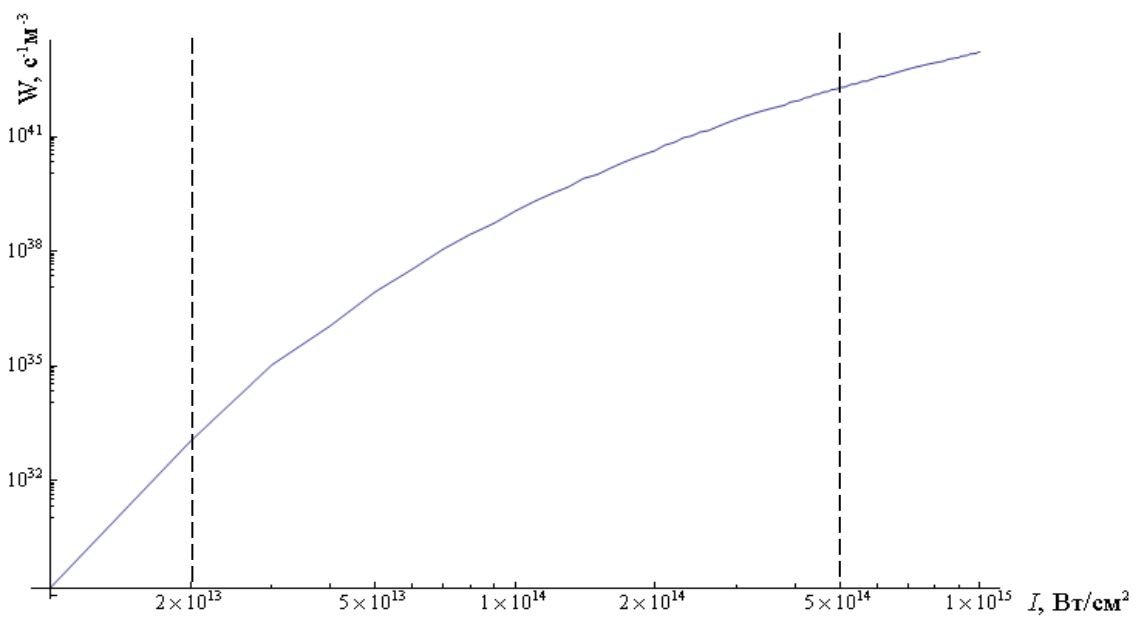
Энд E_0 – импульсийн цахилгаан орны амплитудын хамгийн их утга, τ – импульсийн үргэлжлэх хугацааг тодорхойлж буй параметр.

Лавины ионжилттой ба ионжилтгүй горимд лазерын импульсийн үйлчлэлийн явцад плазмын нягт ρ хугацаанаас хэрхэн хамаарахыг зураг 17-д харуулав. Ойлгомжтой байхын тулд цахилгаан орны хүчлэгийн амплитуд хугацаанаас хэрхэн хамаарахыг мөн үзүүлэв.



Зураг 17. Лавины ионжилттой (1) ба ионжилтгүй (2) горимд лазерын импульсийн үйлчлэлийн явцад плазмын нягт ρ хугацаанаас хэрхэн хамаарах нь. Цахилгаан орны хүчлэгийн амплитуд хугацаанаас хэрхэн хамаарах нь (3).

Келдышийн формализмын тусламжтай тодорхойлогдож буй орчны олон фотонт туннелийн ионжилтын хурд гэрлийн эрчмээс хамаарахыг тооцоолсон (зураг 18). Зураг дээрх босоо тасархай шугам нь олон фотонт ионжилтын (зүүн талд нь ионжилт харьцангуй бага үед), туннелийн (баруун) ба шилжилтийн мужуудыг (голд нь) илэрхийлж байгаа.



Зураг 18. Олон фотонт туннелийн ионжилтын хурдны хамаарал.

Лазерын импульсийн филаментацийн нөлөөн доор үүссэн өнгөний төвүүдийн орон зайн түгэлтийг загварчлав. Филаментацийн загвар нь дифракц, өөрөө фокуслах үзэгдэл, шугаман бус олон фотонт туннелийн ионжилт, лавины ионжилт, плазмын улмаас гэрэл фокусаа алдах зэргийг тооцсон шугаман бус Шредингерийн тэгшитгэлээр бодогдоно:

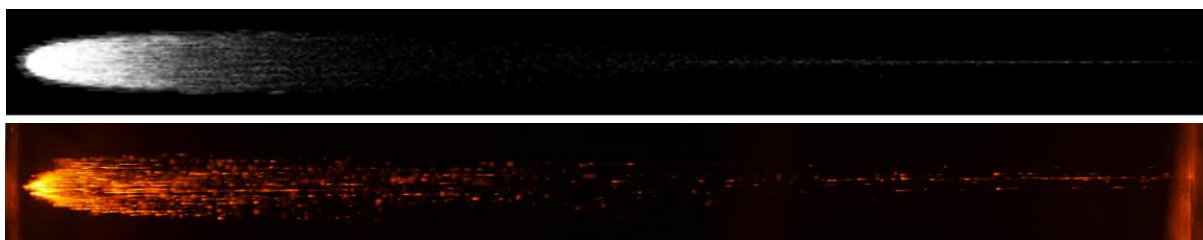
$$\frac{\partial A}{\partial z} = \left(-i \frac{c}{2\omega_0 n_0} \Delta_{\perp} - i \frac{\omega_0}{c} n_2 |A|^2 + i \frac{2\pi e^2 \rho}{c n_0 \omega_0^2 m_e} \omega_0 - \frac{4\pi U}{c n_0 |A|^2} W(|A|) \right) A \quad (6)$$

Энд A – лазерын импульсийн цахилгаан орны комплекс амплитуд, x ба y – орон зайн хөндлөн огтлолын координатууд, z – тууш координат, ω_0 – гэрлийн орны хэлбэлзлийн гол давтамж, c – вакуум дахь гэрлийн хурд, ρ – плазм дахь электронуудын концентраци, m_e – электроны эффектив масс, U – хориотой бүсийн өргөн, W – орчны ионжилтын хурд эрчмээс хамаарах хамаарал.

Загварт лазерын импульсийн эхний орон зайн загвар нь олон филаментцийг эхлүүлэхийн тулд бага зэрэг хэлбэлзэл нэмсэн, гадаад линзийн фокусын тохиргоотой Гауссын хэлбэртэй байна гэж үзсэн.

Импульсийн нөлөөгөөр плазмын концентрац үүсэх явц нь (4) тэгшитгэлийн тусламжтай загварчлагдсан. Загварт өнгөний төвүүд үүсэх нягт нь плазмын концентрацтай квадрат хамааралтай байна гэж таамагласан.

Дифференциал тэгшитгэлийг бодохын тулд систем тэгшитгэл зохиож, түүнийг бодох програмыг Фортран дээр бичсэн. $1100 \times 1100 \times 9000 \times 320$ хэмжээтэй орчны цэгийг (x, y, z, t) , x ба y – 1 мкм , z – 3 мкм , t – 0.5 фс алхамтай торны дагуу тооцоолсон. Энэ загвар нь шарагдсан талстуудад F_2 өнгөний төв хэрхэн огторгуйд түгсэнийг харуулдаг (зураг 19).



Зураг 19. 950нм долгионы урттай фемтосекундтийн лазерын импульсийн өөрөө фокуслагдах горимд LiF талстад үүсээж буй F_2 өнгөний төвүүд орон зайд хэрхэн түгэхийг харуулсан загвар (дээд талд нь); 5мДж энергитэй фемтосекундийн импульсээр үүссэн нэг суваг тухайн хэлбэрийн гажиг хэрхэн үүссэнийг люминесценцийн тархалтын эрчмээр харуулав (люминесценци нь 470нм долгионы урттай лазерын тусламжтай өдөөгдсөн (MicroTime 200 микроскопын өгөгдөл)).



Зураг. 20. Лити фторын талст (зүүн талд), түүнд тэмдэглэгдсэн "Үлгэрийн луу" -гийн дүр төрх (баруун талд).

Судалж буй физик процессууд нь талстад оптик дүрс (мэдээлэл) бичих технологид хэрэглэгдэж болно. Жишээ болгон зураг 20 дээр цацрагийн фокусын

өндөр цартай горимд фемтосекундийн лазераар лити фторын талстад “үлгэрийн лууг” дүрсэлж үзүүлэв. Зургийн хэмжээ $5 \times 5 \text{ мм}$. Люминесценцийн зургийг харуулахын тулд 405 нм долгионы урттай лазерын импульсийг ашигласан ба ногоон өнгийн гэрлийн шүүлтүүр ашигласан. Өдөөгдөөгүй үедээ талст нь тунгалаг харагдана. Мөн чанартаа талст дахь мэдээлэл нууцлагдаж буй хэрэг юм.

Дүгнэлт

“Талстын орчинд филаментацийн горимд лазерын цацрагийн улмаас үүссэн гажгийн коагуляци ба агрегацийн механизмууд” ОХУ-Монгол улсын ШУТ-ийн хамтарсан төслийн хүрээнд фемтосекундийн хүчтэй лазерын цацрагаар шарагдсан лити фторын талстад үүссэн гажгийн топологи, люминесценцийн спектр, кинетик шинж чанар, сувгийн бичил бүтцийн судалгааг туршилтаар гүйцэтгэсэн ба туршилтын үр дүнд үндэслэн филамент үүсэх үеийн агрегацийн болон коагуляцын процесс дахь бодисын дотоод халалтын үзүүлэх нөлөөллийг тооцооллыг аргаар тодорхойлсон. Үүний зэрэгцээ лазерын импульсийн үйлчлэлээр хатуу биетэд плазмын нягт өсөх явцын математик загварыг тодорхойлсон. Дээрх судалгаа туршилтаар дараах үр дүнд хүрсэн:

- Фемтосекундийн лазерын импульсийн тоо (шаралтын хугацаа) нэмэгдэхийн хэрээр цэнэг солилцох, өнгөний бөөгнөрсөн төвүүд үүсэхтэй зэрэгцэн явагдах сул орон зай болон F_2^+ хөдөлгөөнт төвийн оролцоотойгоор бөөгнөрөх процессууд эхэлдэг бөгөөд өнгөний төвүүдийн концентрац ихсэх тусам шингээлт нэмэгдэж, талстаар нэвтэрсэн лазерын импульсийн энергийн хэмжээ буурч байна.
- Өнгөний төвүүдийн нэгдлийн эцсийн бүтээгдэхүүн нь 2 анион болон 1 катионы хоосон орон зайд байрласан молекуляр галлоид ионууд болох X_3^- нүх-интерстициал төлөвийн тогтвортой гажгууд байна.
- Фемтосекундийн лазераар шарах үед өнгөний төвийн болон бусад тогтвортой гажгийн түгэлт нь нэгэн төрлийн бус байх бөгөөд мөрийн төвд ойртох тусам гажгийн төрөл бүрийн хэлбэрүүдийн концентрац өөрчлөгдөж байна.

Төслийн үр дүнгээр мэргэжлийн сэтгүүл болон олон улсын хурлуудад нийт 15 эрдэм шинжилгээний өгүүлэл хэвлүүлснээс 7 нь Web science мэдээллийн санд бүртгэлтэй инпакт-фактор бүхий сэтгүүлүүдэд хэвлэгдсэн байна.

Төслийн цаашид үргэлжлүүлэн мэдээллийг нууцлан урт хугацаанд тогтвортой хадгалах судалгааг хийх шаардлагатай.

Төслийн үр дүнгээр хэвлэгдсэн бүтээлийн жагсаалт

1. Дресвянский В.П., Кузнецов А.В., Содном Энхбат, Мартынович Е.Ф. Formation of aggregate color centers under the action of femtosecond laser pulses. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1115 - 052029, 1-8.
2. Дресвянский В.П., Зилов С.А., Кузнецов А.В., Содном Энхбат, Одсүрэн Бухцоож, Мартынович Е.Ф. Laser luminescent polarization microscopy of defects induced in lithium fluoride crystals by femtosecond pulses. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1115 - 052028, 1-7.
3. V. P. Dresvyanskiy, A. V. Kuznetsov, Sodnom Enkhbat, O. Bukhtsooj, N. S. Bobina, S. V. Alekseev, V. F. Losev, E. F. Martynovich. The role of avalanche ionization in generation of defects in lithium fluoride crystals under the action of femtosecond laser pulses. *Proc. SPIE 11322, XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications*, 113222A.
4. A.V. Kuznetsov, V.P. Dresvyansky, O. Bukhtsoozh, S. Enkhbat, and E.F. Martynovich. The role of heat effects in the process of formation of color centers in LiF during filamentation of femtosecond laser pulses. *EPJ Web of Conferences* 220, 02007 (2019).
5. Дресвянский В. П., Кузнецов А. В., Содном Энхбат, Мартынович Е. Ф. Контроль нагрева материала в процессе лазерного дефектообразования. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, 2020, Т. 84, № 7, С. 982-986.
6. Dresvyanskiy V.P., Murzin S.V., Zimin M.D., Enkhbat S., Zilov S.A., Martynovich E.F. The Conversion of Color Centers in Lithium Fluoride Crystals at Temperatures of 50 – 490 °C // *AIP Conference Proceedings*, 2021.
7. Dresvyanskiy V.P., Paperny V.L., Enkhbat S., Lazareva N.L., Zilov S.A., Martynovich E.F. Synthesis and Optical Properties of Lithium Nanoparticles in Wide-Gap Dielectrics // *AIP Conference Proceedings*, 2021.
8. Дресвянский В.П., Алексеев С.В., Кузнецов А.В., Одсүрэн Бухцоож, Содном Энхбат, Мартынович Е.Ф. Механизмы высоконелинейной генерации дефектов в широкозонных кристаллических средах под действием интенсивного лазерного излучения. XVI Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике: Тезисы лекций и докладов, 2018, 53-54.
9. Дресвянский В.П., Бобина Н.С., Содном Энхбат, Суханова Ю.А., Мартынович Е.Ф. Пространственное распределение запасенной светосуммы фемтосекундного лазерного излучения в кристаллах LiF:Mg,Ti. XVI Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике: Тезисы лекций и докладов, 2018, 145-146.
10. Мартынович Е.Ф., Дресвянский В.П., Лазарева Н.Л., Одсүрэн Бухцоож, Содном Энхбат, Кострюков П.В., Перминов Е.Б., Конященко А.В. Анизотропия лазерного дефектообразования в кристаллических средах. XVI

- Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике: Тезисы лекций и докладов, 2018, 101-102.
11. Кузнецов А.В., Дресвянский В.П., Бухцоож О., Энхбат С., Мартынович Е.Ф. РОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В LiF ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ. В книге: XIII международные чтения по квантовой оптике (IWQO - 2019). Сборник тезисов. 2019. С. 179.
 12. Дресвянский В.П., Энхбат С., Паперный В.Л., Мартынович Е.Ф. ПРОЦЕССЫ КОАГУЛЯЦИИ, СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ В ШИРОКОЗОННЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ. В книге: Материалы Юбилейной международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, посвященной 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске. 2019. С. 28-29.
 13. Кузнецов А.В., Дресвянский В.П., Бухцоож О., Энхбат С., Мартынович Е.Ф. ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА МАТЕРИАЛА НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ. В книге: Материалы Юбилейной международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, посвященной 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске. 2019. С. 46-47.
 14. Дресвянский В.П., Мурзин С.В., Энхбат С., Бухцоож О., Мартынович Е.Ф. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В КРИСТАЛЛАХ ФТОРИДА ЛИТИЯ. В книге: Материалы Юбилейной международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, посвященной 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске. 2019. С. 62-63.
 15. Dresvyanskiy V.P., Kuznetsov A.V., Enkhbat S., Martynovich E.F. The Mechanism of Defect Formation in Dielectric Crystals Under the Influence of Intense Femtosecond Laser Radiation // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects: Abstracts. — Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2020.

**Төслийн үр дүнгээр Web of Science мэдээллийн санд бүртгэлтэй
импакт-фактор бүхий мэргэжлийн сэтгүүлүүдэд хэвлэгдсэн бүтээлийн
жагсаалт**

1. Dresvyanskiy V.P., Kuznetsov A.V., Enkhbat S., Martynovich E.F. Formation of aggregate color centers under the action of femtosecond laser pulses//Journal of Physics: Conf. Series. - 2018. - Т. 1115. - С. 052029-1 - 052029-8. (SCOPUS, doi:10.1088/1742-6596/1115/5/052029).
2. Dresvyanskiy V.P., Zilov S.A., Kuznetsov A.V., Enkhbat S., Bukhtsooj O., Martynovich E.F. Laser luminescent polarization microscopy of defects induced in lithium fluoride crystals by femtosecond pulses//Journal of Physics: Conference Series. Т. 1115. - 2018. - С. 052028-1 - 052028-7. (SCOPUS, doi:10.1088/1742-6596/1115/5/052028).
3. V. P. Dresvyanskiy, A. V. Kuznetsov, Sodnom Enkhbat, O. Bukhtsooj, N. S. Bobina, S. V. Alekseev, V. F. Losev, E. F. Martynovich. The role of avalanche ionization in generation of defects in lithium fluoride crystals under the action of femtosecond laser pulses. Proc. SPIE 11322, XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications, 113222A (11 December 2019); doi: 10.1117/12.2554180. (Импакт-фактор 0.56).
4. A.V. Kuznetsov, V.P. Dresvyansky, O. Bukhtsoozh, S. Enkhbat, and E.F. Martynovich. The role of heat effects in the process of formation of color centers in LiF during filamentation of femtosecond laser pulses. EPJ Web of Conferences 220, 02007 (2019); <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922002007IWQO-2019>. (Импакт-фактор 0.35).
5. Дресвянский В. П., Кузнецов А. В., Содном Энхбат, Мартынович Е. Ф. Контроль нагрева материала в процессе лазерного дефектообразования. Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2020, Т. 84, № 7, С. 982-986. (DOI: 10.31857/S036767652007008X). (Импакт-фактор РИНЦ 0,62).
6. Dresvyanskiy V.P., Murzin S.V., Zimin M.D., Enkhbat S., Zilov S.A., Martynovich E.F. The Conversion of Color Centers in Lithium Fluoride Crystals at Temperatures of 50 – 490 °C // AIP Conference Proceedings, 2021.
7. Dresvyanskiy V.P., Paperny V.L., Enkhbat S., Lazareva N.L., Zilov S.A., Martynovich E.F. Synthesis and Optical Properties of Lithium Nanoparticles in Wide-Gap Dielectrics // AIP Conference Proceedings, 2021.

Хавсралт 1

Web of Science мэдээллийн санд бүртгэлтэй импакт-фактор бүхий
мэргэжлийн сэтгүүлүүдэд хэвлэгдсэн бүтээлүүд

IOPscience



Journals ▾

Books

Publishing Support

Login ▾

Journal of Physics: Conference Series

PAPER • OPEN ACCESS

Formation of aggregate color centers under the action of femtosecond laser pulses

V P Dresvyanskiy¹, A V Kuznetsov¹, S Enkhbat² and E F Martynovich^{1,3}

Published under licence by IOP Publishing Ltd

[Journal of Physics: Conference Series, Volume 1115, Issue 5](#)

Citation V P Dresvyanskiy et al 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1115** 052029



Article PDF

References ▾

+ Article information

Abstract

A complex study of primary and aggregate defects formation in LiF crystals under the action of femtosecond laser pulses is carried out. These processes were compared for nominally pure and dosimetric LiF crystals (LiF:Mg,Ti). Taking into account high concentration of generated electron-hole pairs, it is proposed that the formation of primary Frenkel defects as a result of direct electron-hole recombination is possible along with the excitonic mechanism. Subsequent processes of aggregation of primary defects with stable defects formation are similar to LiF coloration with X-rays and other types of radiation.



Search My Selection Search History

[Clear All](#) [Insert Unicode](#)

Search the INIS Repository

Everywhere

Search

[Advanced Search](#)

Limit to results with full text

Primary Subject

CLASSICAL AND QUANTUM MECHANICS, GENERAL PHYSICS (1)

Subject Area

Nuclear Physics (1)

Record Type

Journal Article (1)

Literature Type

Conference (1)

Journal Title

Journal of Physics. Conference Series (Online) (1)

Publication Year

2018 (1)

Publication Year Range

2011 or later (1)

Country of publication

Results 1 - 1 of 1. Search took: 0.007 seconds



DOI

Laser luminescent polarization microscopy of defects induced in lithium fluoride crystals by femtosecond pulses



Dresvyanskiy, V P (Irkutsk Branch of Institute of Laser Physics SB RAS, 130a Lermontov Str., Irkutsk, 664033 (Russian Federation)); Zilov, S A (Irkutsk Branch of Institute of Laser Physics SB RAS, 130a Lermontov Str., Irkutsk, 664033 (Russian Federation)); Kuznetsov, A V (Irkutsk Branch of Institute of Laser Physics SB RAS, 130a Lermontov Str., Irkutsk, 664033 (Russian Federation)); Martynovich, E F (Irkutsk Branch of Institute of Laser Physics SB RAS, 130a Lermontov Str., Irkutsk, 664033 (Russian Federation)); Enkhbat, S (Institute of Physics and Technology MAS, 54B Enkhtaivan Ave., Ulaanbaatar, 210651 (Mongolia)); Bukhtsooj, O (Institute of Physics and Technology MAS, 54B Enkhtaivan Ave., Ulaanbaatar, 210651 (Mongolia)), E-mail: nadvp@list.ru

[Citation](#) [Export](#) ...

Abstract

[en] We propose a spatial statistical model, based on the model of moving foci, of distribution of aggregate centers and other final products of reactions after the passage of a femtosecond laser pulse in a lithium fluoride crystal. Concentration of these defects grows higher on the way from the periphery to the center of filament trace. This model was confirmed experimentally with use of polarization confocal luminescence scanning microscopy method. The research results showed that the periphery of the filament trace is filled predominantly with stable F centers, the region closer to the filament trace center – with F₂ – color centers, F₃⁺ centers appear with the increasing concentration of anionic vacancies as the distance to the center of the filament trace decreases on the way to the filament trace center. Strongly damaged lattice area containing colloidal lithium particles and dislocation loops is located in the filament trace center itself. (paper)

11 December 2019

The role of avalanche ionization in generation of defects in lithium fluoride crystals under the action of femtosecond laser pulses

V. P. Dresvyanskiy, A. V. Kuznetsov, Sodnom Enkhbat, O. Bukhtsooj, N. S. Bobina, S. V. Alekseev, V. F. Losev, E. F. Martynovich

[Author Affiliations +](#)

Proceedings Volume 11322, XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications; 113222A (2019) <https://doi.org/10.1117/12.2554180>

Event: XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2019), 2019, Tomsk, Russian Federation

ARTICLE ▾

FIGURES &
TABLES

REFERENCES

CITED BY ▾

Abstract

The paper presents the results of experimental and theoretical studies of the role of avalanche ionization in the process of highly nonlinear generation of electron-hole pairs in the interaction of intense femtosecond laser radiation with dosimetric crystals LiF:Mg,Ti. We assume that the effective formation of defects of hole-interstitial type, which consist of molecular halogen ions placed in one cationic and two anionic vacancies, distinguished by high-temperature peaks in the thermally stimulated luminescence curves, is feasibly connected with avalanche ionization processes occurring in the regions of passage of light filaments. The calculated dependences of the plasma density on time during the laser pulse made with taking into account the avalanche ionization for this type of crystals show that the contribution of avalanche ionization to the electron-hole plasma density is comparable to that of the multiphoton tunneling mechanism.



All issues ▶ Volume 220 (2019) ▶ EPJ Web Conf., 220 (2019) 02007 ▶ Abstract

Open Access

Issue	EPJ Web Conf. Volume 220, 2019 XIII International Workshop on Quantum Optics (IWQO-2019)
Article Number	02007
Number of page(s)	2
Section	Oral talks
DOI	https://doi.org/10.1051/epjconf/201922002007
Published online	25 October 2019

EPJ Web of Conferences 220, 02007 (2019)
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201922002007>

The role of heat effects in the process of formation of color centers in LiF during filamentation of femtosecond laser pulses

A.V. Kuznetsov¹, V.P. Dresvyansky¹, O. Bukhtsoozh², S. Enkhbat² and E.F. Martynovich¹

¹ Irkutsk branch of the Institute of Laser Physics SB RAS, 664033 Irkutsk, Russia

² Institute of Physics and Technology, Mongolian Academy of Science, 210651 Ulaanbaatar, Mongolia

Published online: 25 October 2019

Abstract

The possibility of the influence of thermal effects on the formation of color centers during laser femtosecond filamentation in a LiF crystal has been investigated theoretically. The conditions are formulated under which the influence of thermal effects can be noticeable.

© The Authors, published by EDP Sciences, 2019



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Известия РАН. Серия физическая, 2020, Т. 84, № 7, стр. 982–986

КОНТРОЛЬ НАГРЕВА МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ

В. П. Дресвянский^{1,*}, А. В. Кузнецов¹, Содном Энхбат², Е. Ф. Мартынович¹

¹ Иркутский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Иркутск, Россия

² Институт физики и технологии Монгольской академии наук
Улан-Батор, Монголия


* E-mail: nadvp@list.ru

Поступила в редакцию 14.02.2020

После доработки 16.03.2020

Принята к публикации 27.03.2020

DOI: 10.31857/S036767652007008X

 [Полный текст \(PDF\)](#)

Инструменты

[следующая статья выпуска](#)

[предыдущая статья выпуска](#)

[содержание выпуска](#)

Известия РАН. Серия физическая

[Архивы выпусков](#)

[Информация о журнале](#)

[Отправить рукопись в журнал](#)

[Аннотация](#) [Полный текст](#) [Список литературы](#) [Дополнительные материалы](#)


Аннотация

Представлены результаты исследований роли нагрева материала в процессе образования дефектов в условиях множественной филаментации повторяющихся лазерных импульсов в кристаллах фторида лития. Предложена методика контроля локального нагрева в местах прохождения световых филаментов, основанная на анализе соотношения интенсивностей полос поглощения простых и агрегатных центров окраски в спектрах облученных кристаллов.

AIP Conference Proceedings



[HOME](#) [BROWSE](#) [INFO](#) [FOR AUTHORS](#) [FOR ORGANIZERS](#)

 [SIGN UP FOR ALERTS](#)

[Home](#) > [AIP Conference Proceedings](#) > [Volume 2392, Issue 1](#) > [10.1063/5.0062089](#)

 No Access • Published Online: 27 July 2021

[◀ PREVIOUS](#) [NEXT ▶](#)

The conversion of color centers in lithium fluoride crystals at temperatures of 50–490°C

AIP Conference Proceedings **2392**, 030003 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0062089>

V. P. Dresvyanskiy^{1,a)}, S. V. Murzin^{1,b)}, M. D. Zimin^{2,c)}, S. Enkhbat³, S. A. Zilov^{1,d)}, and E. F. Martynovich^{1,4,e)}

[View Affiliations](#) [View Contributors](#)

 PDF

 E-READER

[ABSTRACT](#)

[TOOLS](#)

[SHARE](#)

[METRICS](#)



ABSTRACT

Studies of the photoluminescence spectra of γ -irradiated lithium fluoride crystals during temperature annealing in the temperature range from 50 to 490°C were conducted. Experimental data show that F_2 and F_3^+ color centers decay at different rates as temperature increases. The transformation of the F_2 and F_3^+ centers is accelerated by action of laser radiation on γ -irradiated LiF crystals during annealing.

Synthesis and optical properties of lithium nanoparticles in wide-gap dielectrics

AIP Conference Proceedings **2392**, 020003 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0062096>V. P. Dresvyanskiy^{1,b)}, V. L. Paperny^{2,a)}, S. Enkhbat³, N. L. Lazareva^{1,2,c)}, S. A. Zilov^{1,d)}, and E. F. Martynovich^{1,2,e)}[View Affiliations](#) [View Contributors](#)

PDF



E-READER

ABSTRACT

TOOLS

SHARE

METRICS



ABSTRACT

Characteristics of LiF crystals irradiated by pulsed laser radiation with pulse duration of 50 fs, an energy of about 5 mJ, and a wavelength of 950 nm were studied. After single-pulse irradiation, a band with maximum at wavelength of 450 nm related to formation of F_3 color centers was observed in the extinction spectra of sample. With an increase in the number of pulses, components associated with more complex aggregate F_3 (R), F_3 , and F_4 (N) centers appear in the band structure. The observed association of F_3^+ centers leads to the formation of larger aggregates up to the precipitation of nanoscale lithium clusters, which is confirmed by comparison of spectra of the crystals irradiated with laser pulses and the crystals irradiated with high-energy Li^+ ions with use of ion implanter. Atomic force microscopy study confirmed the conclusion that lithium nanoparticles with sizes in the range of 60–90 nm were formed in surface layer of LiF crystal as a result of laser irradiation.