

# LiYF<sub>4</sub> болон Pr:LiYF<sub>4</sub> нэгдлүүдийг гарган авах, оптик шинж чанарын судалгаа

П.Батцэнгүүн<sup>1</sup>, Н.Төвжаргал<sup>2,3\*</sup>, Денг Лили<sup>2</sup>, Н.Цогбадрах<sup>2</sup>, Ж.Даваасамбуу<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> ШУА-ийн Физик, Технологийн хүрээлэн, Улаанбаатар 13330, Монгол Улс

<sup>2</sup> Монгол Улсын Их Сургууль, Физикийн тэнхим, Улаанбаатар 14210, Монгол улс

<sup>3</sup> Монгол Улсын Их Сургууль, Лазерын судалгааны төв, Улаанбаатар 14210, Монгол улс

Бид энэхүү судалгааны ажлаар хатуу төлөвийн урвалын арга ашиглан LiYF<sub>4</sub> болон газрын ховор элемент Pr<sup>3+</sup> ионоор хольцдосон Pr:LiYF<sub>4</sub> нэгдлүүд гарган авсан болон үзэгдэх гэрлийн мужид цацаргалт хийх Pr:LiYF<sub>4</sub> нэгдлийн оптик шинж чанарыг судалсан үр дүнг танилцуулж байна. Рентген дифракц болон оптик шингээлтийн хэмжилтийн үр дүнгээс эдгээр дээжүүдийг амжилттай гарган авсан болох нь харагдаж байна. Pr:LiYF<sub>4</sub>-ийн оптик шингээлт болон цацаргалтын спектрийн хэмжилтээс энэхүү материал нь үзэгдэх гэрлийн янз бүрийн долгионы уртын мужид цацаргалт хийх боломжтой материал болохыг үзүүлэв.

**Түлхүүр үг:** Үзэгдэх гэрлийн лазер, хатуу төлөвийн урвал, оптик шингээлт, цацаргалт.

**Хүлээн авсан:** 2022 оны 11-р сарын 15

**Хэвлэлтэнд зөвшөөрсөн:** 2022 оны 11-р сарын 30

**Сүлжээнд орсон:** 2022 оны 12-р сарын 05

## I. ОРШИЛ

Сүүлийн жилүүдэд лазерын технологид суурилсан эрдэм шинжилгээ болон арилжааны зориулалт бүхий дэвшилтэт технологийн хэрэглээ, судалгааны арга зүйн хөгжүүлэлт эрчимтэй хийгдэж байна.

Нийтлэг ашигладаг лазерууд нь ихэвчлэн хэт ягаан болон нил улаан туяаны мужуудад цацаргадаг бол үзэгдэх гэрлийн мужид цацаргадаг лазер маш цөөн байдаг [1]. Үзэгдэх гэрлийн мужид цацаргалт хийдэг лазерууд ихэвчлэн хийн лазер байдаг. Хатуу биеийн лазерууд шууд үзэгдэх гэрлийн цацаргалт хийдэггүй давтамжийн хувиргалт хийх нэмэлт шугаман биш кристалл, нарийн төвөгтэй оптик систем ашиглаж бидний нийтлэг хэрэглэдэг ногоон, цэнхэр гэрлийн лазеруудыг үүсгэдэг. Ингэж үзэгдэх гэрлийн лазер гарган авах нь олон төрлийн оптик систем ашигладаг, нарийн төвөгтэй ажиллах зарчимтай байдаг зэргээс шалтгаалж энергийн алдагдал их гардаг [2, 3]. Иймээс сүүлийн үед судлаачид үзэгдэх гэрлийн мужид шууд цацаргалт хийдэг материал гарган авах, түүнийг сайжруулах судалгааг эрчимтэй хийж байна. Тухайлбал лазер үүсгэгч идэвхт орчны материал LiLuF<sub>4</sub>-ыг газрын ховор элемент (Tb)-ээр хольцлоход тухайн материал үзэгдэх ногоон, шар, улаан гэрлийг цацаргах боломжтой болохыг судлаачид үзүүлсэн байдаг [4]. Иймээс бид үзэгдэх гэрлийн мужид шууд цацаргалт хийх, энергийн алдагдал багатай, их гаралтын чадлыг бий болгоход зориулагдсан лазерын үүсгүүрийн идэвхт орчноор ашиглах шинэ төрлийн материал гарган авах, тэдгээрийн бүтэц болон шинж чанарын су-

далгааг хийж эхлээд байна.

Бидний сонгож авсан LiYF<sub>4</sub> кристалл нь шее-лит бүтэцтэй, тетрагонал тэгш хэмтэй, нил улаан туяаны мужид цацаргалт хийдэг материал бөгөөд түүний Y<sup>3+</sup> ионыг бусад гурван валенттай газрын ховор элементээр орлуулан хольцлоход энэ системд цэнэгийн өөрчлөлт, торын гажиг үүсэхгүй болон дулаанд тэсвэртэй зэрэг давуу талуудаа алддаггүй [13]. Газрын ховор элемент ялангуяа гурван валенттай празеодим (Pr<sup>3+</sup>) ионы энергийн диаграмм маш сонирхолтой бөгөөд энэхүү материалаар хольцлон үзэгдэх гэрлээс нил улаан туяаны муж хүртэл цацаргалт хийх янз бүрийн лазерын материал гарган авах судалгаа сүүлийн жилүүдэд эрчимтэй хийгдэж байна [6–10].

Иймээс энэхүү ажлаар нил улаан туяаны мужид цацаргалт хийдэг LiYF<sub>4</sub>, газрын ховор элемент Pr-аар хольцлон сайжруулсан үзэгдэх гэрлийн мужид янз бүрийн долгионы урт бүхий лазерын цацаргалт хийх материал Pr:LiYF<sub>4</sub>-ийн нунтаг дээж гарган авах, Pr:LiYF<sub>4</sub> нэгдлийн оптик шинж чанарыг судлах зорилготой.

## II. ТУРШИЛТ

### 2A. Материал болон дээж гарган авах:

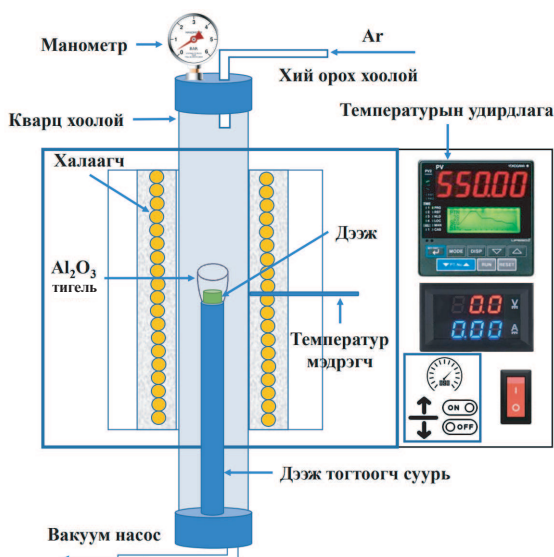
LiF, YF<sub>3</sub>, PrF<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub> (99.99%, Aladdin) зэрэг эх бодисуудыг ашиглан ямар нэг боловсруулалт хийхгүйгээр шууд хатуу төлөвийн урвалын аргаар LiYF<sub>4</sub> болон Pr:LiYF<sub>4</sub> нэгдлүүдийг гарган авах болно.

Фторт нэгдэл бүхий материалыг гарган авахад өндөр вакуум орчин бүхий зуух ашиглах, исэл-

\*tuvjargal@num.edu.mn

дэлт бохирдлоос сэргийлэх шаардлага гардаг тул өндөр цэвэршилтэй материал гарган авахад хүндрэлтэй байдаг. Судлаачид  $\text{LiYF}_4$  нэгдлийг ихэвчлэн өндөр вакуум орчин эсвэл  $\text{CF}_4$  болон  $\text{HF}$  хийн орчинд гарган авах, эсвэл битүүмжилсэн цагаан алтан тигельд хайлуулан гарган авдаг байна. Дэгдэмхий шинж чанартай  $\text{CF}_4$  болон  $\text{HF}$  орчин нь байгаль орчин, хүний эрүүл мэндэд нэн хортой тул эдгээр орчныг ашиглах дээж гарган авахаас зайлсхийх хэрэгтэй [11]. Дээж гарган авах үед эх бодис болон  $\text{LiF}$ ,  $\text{YF}_3$  зэргийг агаарын чийгтэй урвалд орж исэлдүүлэхгүй, хайлж байхдаа ууршиж алга болгохгүй байх ёстой.  $\text{YF}_3$  нь агаар дэх  $\text{H}_2\text{O}$ -тай нийлж гидролизийн урвалд ( $\text{YF}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{YOF} + 2\text{HF}$ ) орж  $\text{YOF}$  үүсэж дээжийн цэвэршилтийг бууруулдаг.

$\text{LiF}$  болон  $\text{YF}_3$  систем эвтектик фазын диаграммтай бөгөөд эдгээрийн молийн харьцаа 51%  $\text{LiF}$ :49% $\text{YF}_3$  байхад цэвэр  $\text{LiYF}_4$  нэгдэл үүсэх боломжтой бөгөөд энэ нэгдэл нь  $819^\circ\text{C}$  дээш нэгэн төрлийн уусмал хэлбэрт ордог [12].  $\text{LiF}$  нь хайлах температураас дээш амархан ууршдаг тул түүний хэмжээг бага зэрэг нэмэгдүүлж авдаг. Иймээс бид  $\text{LiYF}_4$  дээж гарган авах туршилтад  $\text{LiF}:\text{YF}_3=52\%:48\%$  байхаар тооцсон бол  $\text{Pr:LiYF}_4$  дээж гарган авах туршилтад  $\text{LiF}:\text{YF}_3:\text{PrF}_3=52\%:47\%:1\%$  байхаар сонгож авсан.



1-р зураг. Дээж хайлуулах босоо Бриджманы зуухны схем

Дээж гарган авах туршилтыг босоо Бриджманы зуух ашиглан гүйцэтгэсэн. Энэхүү зуухыг бид цаашид  $\text{Pr:LiYF}_4$  монокристалл дээж ургуулах зорилгоор вакуум болон инертийн хийн орчинд дээж хайлуулах нэмэлт систем суулгаж сайжруулсан болно. 1-р зурагт энэхүү зуухны бүдүүвч схемийг үзүүлэв. Зуух нь босоо хэлбэрийн битүүмжлэл бүхий кварц хоолой, инертийн хий оруулах болон вакуум соруулах системтэй, 0.1МПа даралтын орчинд ашиглах боломжтой,  $1100^\circ\text{C}$  хүртэл халах

бөгөөд температурын удирдлага (YOKOGAWA, UP550, Япон) нь  $\pm 1^\circ\text{C}$  нарийвчлал бүхий автомат тохируулгатай, дээжийг янз бүрийн хурдтайгаар дээш доош хөдөлгөх мотор бүхий нэгдсэн системтэй.

Бид угсарч бэлдсэн зуухаа ашиглан хүрээлэн буй орчин болон хүний эрүүл мэндэд хоргүй аргаар цэвэршилт өндөртэй  $\text{LiYF}_4$  болон  $\text{Pr:LiYF}_4$  нэгдлүүдийг гарган авах тохиромжтой горим тогтоохын тулд 3 өөр аргаар туршилтыг гүйцэтгэсэн. Үүнд:

- **Туршилт 1:** Дээжээ зуухандаа байршуулаад 5 цагийн турш вакуум насосоор соруулсны дараа битүүмжилсэн. Дээж дахь  $\text{YF}_3$  нь агаарын чийгтэй урвалд орохоос сэргийлж бүрэн хатаахын тулд  $60^\circ\text{C}$ -т 12 цаг,  $250^\circ\text{C}$ -т 2 цаг, дээжийн хайлалтын явцыг эхлүүлэхийн өмнө нэмэлт гаднын бохирдлыг арилгах зорилгоор  $800^\circ\text{C}$ -т 3 цаг халаагаад, үүний дараа  $1000^\circ\text{C}$ -т 3 цаг хайлуулан аянд нь хөргөх шаталсан горимоор явуулсан,
- **Туршилт 2:** Халаах, хайлуулах процесст үүсэж байгаа хаягдлыг гадагшлуулах зорилгоор дээж гарган авах бүх процессын туршид тасралтгүй вакуум соруулж, туршилт 1-ийн горимын дагуу туршилтыг явуулсан.
- **Туршилт 3:** Эцэст нь дээж дэх нэмэлт  $\text{YOF}$ -ийн бохирдлоос салгах зорилгоор эх бодисын жингийн 5%-аар  $\text{NH}_4\text{HF}_2$ -ийг нэмж туршилтыг гүйцэтгэсэн. Нэмэлт  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  оруулж өгснөөр  $250^\circ\text{C}$ -т  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  задарч  $\text{NH}_3 + 2\text{HF}$  нэгдлүүд үүсэх ба исэлдэлтийн дүнд үүсэх  $\text{YOF}$  болон  $\text{HF}$  нь дараах урвалд орно  $\text{YOF} + 2\text{HF} \rightarrow \text{YF}_3 + \text{H}_2\text{O}$ , эндээс үүсэх усны уур болон  $\text{NH}_3$  сорогдон алга болж дээжийн цэвэршилт сайжрах боломжтой [11]. Энэхүү туршилтыг  $25^\circ\text{C}$ -т 12 цаг,  $150^\circ\text{C}$ -т 2 цаг,  $500^\circ\text{C}$ -т 2 цаг халаагаад, үүний дараа  $950^\circ\text{C}$ -т 3 цаг хайлуулан аянд нь хөргөх шаталсан горимоор явуулсан.

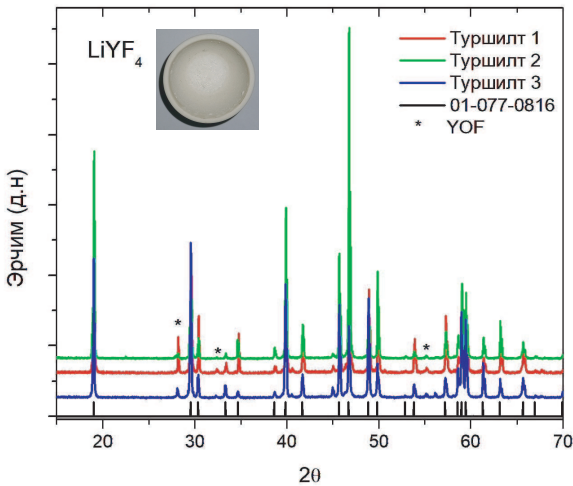
## 2Б. Кристалл болон оптик шинж чанарын хэмжилт:

Гарган авсан дээжүүдийн кристаллжилт, цэвэршилт зэргийг тодорхойлох зорилготой рентген дифракцын хэмжилтийг  $\text{Cu}$  анод,  $\text{Ni}$  филтер бүхий Philips PW1800 (МУИС) нунтгийн рентген дифрактометр (XRD) ашиглан  $0.02^\circ$ -ийн алхамтай  $2\theta=10-70^\circ$  мужид хэмжиж, Le Bail алгоритмд суурилсан Jana2006 программ ашиглан Ритвельдийн аргаар боловсруулсан [13]. Дээжийн оптик шингээлтийн спектрийг 200-800нм мужид Shimadzu UV-2550 (ШУА, ФТХ) UV-Vis спектрофотометрээр, цацаргалтын спектрийг 500-800нм мужид

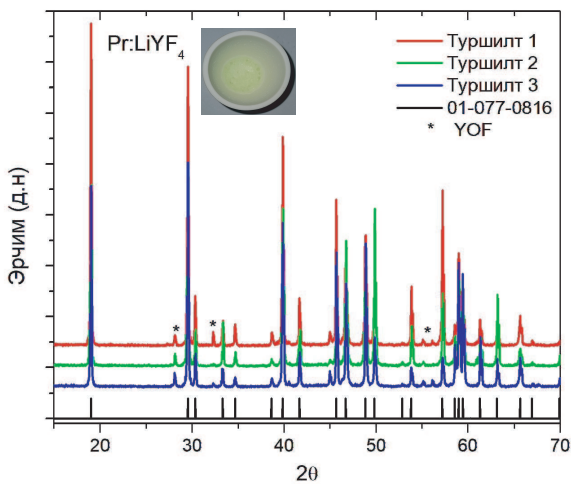
Jasco PF-777 (МУИС) спектрофлуорометрээр тус тус хэмжив.

### III. ҮР ДҮН

2 болон 3-р зурагт дээрх гурван горимын дагуу гарган авсан  $\text{LiYF}_4$  болон  $\text{Pr:LiYF}_4$  нэгдлүүдийн рентген дифракцын хэмжилтийн спектрийг үзүүлэв.



2-р зураг.  $\text{LiYF}_4$  дээжүүдийн рентген дифрактограмм



3-р зураг.  $\text{Pr:LiYF}_4$  дээжүүдийн рентген дифрактограмм

Үүнийг шеелит бүтэц бүхий  $\text{LiYF}_4$  нэгдлийн JCPDS 01-077-0816 стандарт өгөгдлийн сантай харьцуулан үзэхэд дээжүүдийн хувьд харгалзах дифракцын пикүүд бүгд илэрч байгаа нь  $\text{LiYF}_4$  болон  $\text{Pr:LiYF}_4$  дээжүүдийг амжилттай гарган авсан болох нь харагдаж байна.

Туршилт 1 болон туршилт 3-аар арган авсан дээжүүдийн хувьд  $\text{YF}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{YOF} + 2\text{HF}$  урвалын дүнд үүсэн  $\text{YOF}$ -ийн зарим пикүүд тод илэрсэн нь исэлдэлтийн бохирдол өндөр байгааг

илтгэж байна. Харин туршилт 2-ийн дагуу гарган авсан дээжүүдийн  $\text{YOF}$ -ийн зарим пикүүд алга болж багасаж байгаа нь харьцангуй исэлдэлт багатай цэвэр дээж гарсан болохыг илтгэж байна. Түүнчлэн энд эх бодисууд болох  $\text{LiF}$ ,  $\text{YF}_3$ ,  $\text{PrF}_3$ -ийн рентген дифракцын пикүүд илрэхгүй байгаа нь дээж бүрэн нэгдэх урвалд орж  $\text{LiYF}_4$  болон  $\text{Pr:LiYF}_4$  нэгдлүүд үүссэн болохыг харуулж байна.  $\text{LiYF}_4$  дээжийг  $\text{Pr}$ -ээр хольцлох үед  $\text{Y}^{3+}$  ионы байрлалд  $\text{Pr}^{3+}$  ионууд суух бөгөөд ингэж суусан тохиолдолд кристалл торын гажиг үүсэхгүй тул ижилхэн дифракцын пикүүд өгдөг.  $\text{LiYF}_4$  нь өнгөгүй тунгалаг байдаг бол түүнийг  $\text{Pr}^{3+}$  ионоор хольцлоход ногоон өнгийн кристалл үүсдэг. 2 болон 3-р зурагт дотор талд гарган авсан дээж тус бүрийн зургийг үзүүлэв. Эндээс үзэхэд  $\text{LiYF}_4$  дээжийг  $\text{Pr}$ -ээр хольцлох үед дээж ногоон өнгөтэй болж байгаа нь түүнийг амжилттай хольцлон  $\text{Pr:LiYF}_4$  дээж гарган авсан болохыг харуулж байна.

4-р зурагт хамгийн өндөр цэвэршилтэй бохирдол багатай туршилт 2-оор гарган авсан  $\text{LiYF}_4$  дээжийн рентген дифракцын хэмжилтийг Jана2006 программ ашиглан Ритвельдийн аргаар JCPDS 01-077-0816 стандарт өгөгдөлтэй харьцуулан боловсруулсан үр дүнг үзүүлэв. Үүний адилаар мөн  $\text{Pr:LiYF}_4$  дээжийн XRD хэмжилтийг боловсруулсан үр дүнгээс дээж тус бүрийн кристаллографийн параметруудийг тодорхойлсон үр дүнг 1-р хүснэгтэд нэгтгэн үзүүлэв.

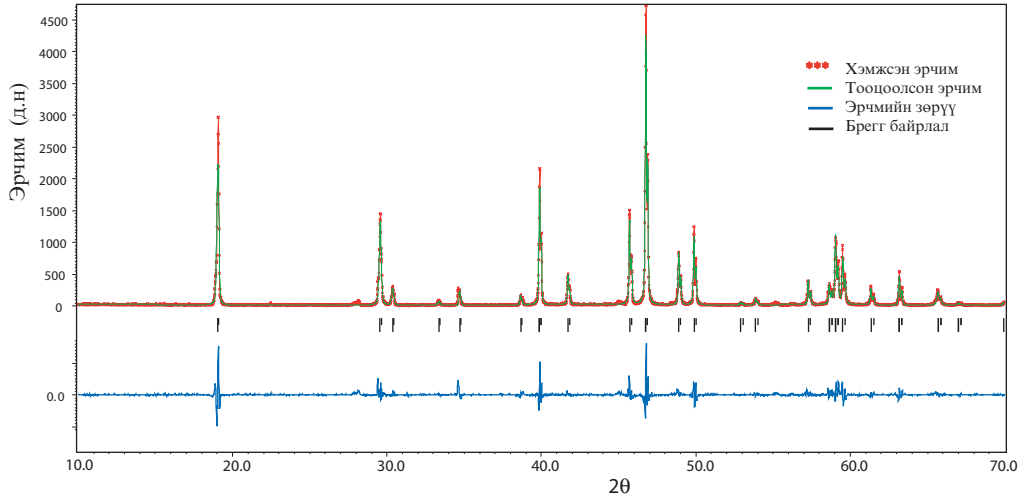
1-р хүснэгт. Рентген дифракцын хэмжилтийн боловсруулалтаар олсон торын параметрууд, GoF фактор

Дээж	$\text{LiYF}_4$	$\text{Pr:LiYF}_4$
Кристалл систем	Шеелит бүтэц	
Тэгш хэм	Тетрагонал	
Огторгуйн групп	I41/a (88)	
Торын тогтмолууд	$a = b = 5.153\text{Å}$ $c = 10.711\text{Å}$	$a = b = 5.174\text{Å}$ $c = 10.753\text{Å}$
GoF	1.9%	1.83%

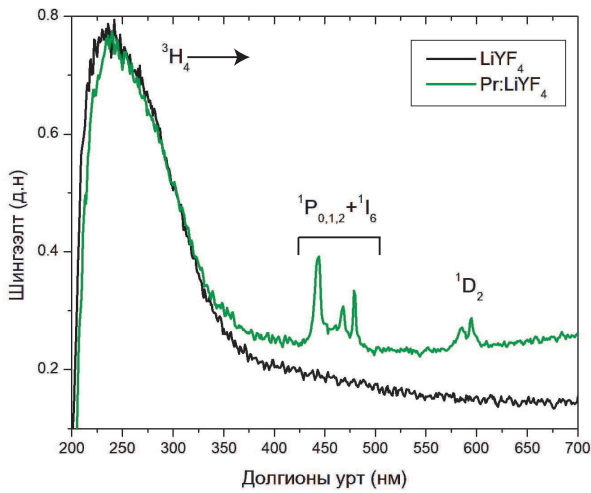
Боловсруулалтын үр дүнгээс үзэхэд  $\text{Pr:LiYF}_4$  дээжийн эгэл торын хэмжээ бага зэрэг томорсон нь  $\text{Pr}$  (112пм)-ийн ионы радиус  $\text{Y}$  (101пм)-ийнхаас том байдагтай холбоотой.

Туршилт 2-оор гарган авсан дээжүүдийн оптик шингээлтийн спектрийг хэмжсэн үр дүнг 5-р зурагт харьцуулан үзүүлэв. Оптик шингээлтийн спектрийг хэмжихдээ тухайн дээж органик уусгагчид уусдаггүй тул  $\text{KBr}$ -тай 1:1 харьцаатай шахмал бэлтгэн хэмжсэн болно.

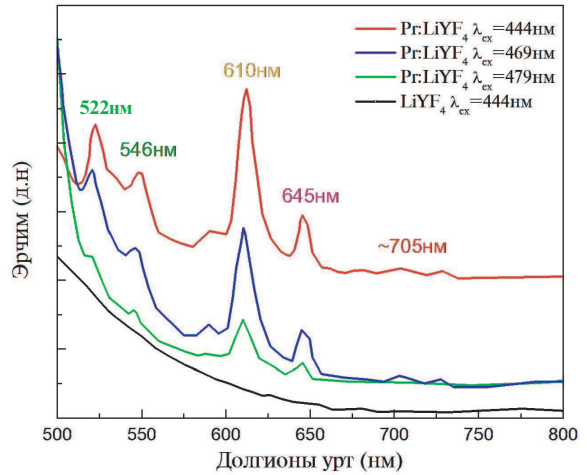
Эндээс үзэхэд  $\text{LiYF}_4$  дээж зөвхөн 250нм мужид шингээлт өгч байгаа бол  $\text{Pr:LiYF}_4$  дээж  $\text{Pr}^{3+}$  ионоор амжилттай хольцлогдсон бөгөөд хольцын нө-



4-р зураг.  $Pr:LiYF_4$  дээжүүдийн рентген дифракцын Ритвельдийн боловсруулалтын үр дүн



5-р зураг.  $LiYF_4$  болон  $Pr:LiYF_4$  дээжүүдийн оптик шингээлтийн спектр



6-р зураг.  $LiYF_4$  болон  $Pr:LiYF_4$  дээжүүдийн цацаргалтын спектр

лөөгөөр үзэгдэх гэрлийн мужид шингээлтийн пикууд өгч байна.

2-р хүснэгт.  $Pr:LiYF_4$  дээжийн оптик шингээлтийн зурвасууд

Шингээлтийн төлөв	Долгионы урт, $\lambda$ (нм)
${}^3H_4 \rightarrow {}^3P_2$	444
${}^3H_4 \rightarrow {}^3P_1 + {}^1I_6$	469
${}^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$	479
${}^3H_4 \rightarrow {}^1D_2$	584, 594

Эдгээр шингээлтийн пикууд нь  $Pr^{3+}$ -ийн үндсэн төлөвийн  ${}^3H_4$  мультиплет төлөвөөс  ${}^3P_{0,1,2} + {}^1I_6$  болон  ${}^1D_2$  төлөвүүд рүү электрон шилжих шилжилттэй холбоотой. Шингээлтийн пикийн долионы урт болон шилжилтийн төлөвүүдийг 2-р хүснэгтэд үзүүлэв. Эндээс бид  $Pr:LiYF_4$  дээжийг ямар долгионы урт бүхий гэрлээр өдөөх боломжтойг харж, сонгох боломжтой болно.

6-р зурагт  $Pr:LiYF_4$  дээжийг  $\lambda_{ex} = 444$ нм, 469нм, 479нм долгионы урт бүхий гэрлээр өдөөх үеийн цацаргалтын спектрууд болон  $LiYF_4$  дээжийг  $\lambda_{ex} = 444$ нм долгионы урт бүхий гэрлээр өдөөх үеийн цацаргалтын спектрийг 500-800нм үзэгдэх гэрлийн мужид харьцуулан үзүүлэв. Энэ  $LiYF_4$  дээж энэ мужид ямар нэг цацаргалт өгөхгүй байна.  $Pr:LiYF_4$  дээжийг  $\lambda_{ex} = 444$ нм, 469нм, 479нм долгионы урт бүхий гэрлээр өдөөх үед үзэгдэх гэрлийн мужид ногооноос улаан хүртэл янз бүрийн долгионы уртад цацаргалт өгч байна. Цацаргалтын спектрийн долионы урт болон цацаргалтын төлөвүүдийг 3-р хүснэгтэд үзүүлэв.

Эндээс үзэхэд өдөөх гэрлийн энерги их байх тусам цацаргалтын эрчим их байгаа бөгөөд үзэгдэх гэрлийн мужид  $Pr^{3+}$  ионы үндсэн цацаргалтын шугамууд илэрч байна. Энэхүү  $Pr:LiYF_4$  дээжийн оптик шингээлт болон цацаргалтын спектрууд нь бусад судалгааны ажлын үр дүнтэй сайн тохирч байна [14, 15].

3-р хүснэгт. Pr:LiYF<sub>4</sub> дээсийг  $\lambda_{ex} = 444\text{нм}, 469\text{нм}, 479\text{нм}$  долгионы урт бүхий гэрлээр өдөөх үеийн цацаргалтын зурвасууд

Цацаргалтын төлөв	Долгионы урт, $\lambda$ (нм)
${}^3P_1 + {}^1I_6 \rightarrow {}^3H_5$	522
${}^3P_0 \rightarrow {}^3H_5$	546
${}^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$	610
${}^3P_0 \rightarrow {}^3F_4$	645
${}^3P_0 \rightarrow {}^3F_3$	$\sim 705$

#### IV. ДҮГНЭЛТ

Бид энэхүү судалгааны ажлаар хатуу төлөвийн урвалын аргаар LiYF<sub>4</sub> болон Pr:LiYF<sub>4</sub> нэгдлүүд гарган авсан болон үзэгдэх гэрлийн мужид цацаргалт хийх Pr:LiYF<sub>4</sub> нэгдлийн оптик шинж чанарыг судалсан үр дүнг үзүүлэв.

Рентген дифракцын болон оптик шингээлтийн хэмжилтийн үр дүнгээс эдгээр дээжүүдийг Бриджманы босоо зуух ашиглан амжилттай гарган авсан болох нь харагдаж байна. LiYF<sub>4</sub> болон Pr:LiYF<sub>4</sub> нэгдлүүд гарган авах тохиромжтой нөхцөлийг зохих молийн харьцаагаар авсан LiF, YF<sub>3</sub> болон PrF<sub>3</sub> эх бодисуудыг нэгэн төрлийн холимог болгон, шахмал бэлтгээд дээж гарган авах процессын туршид тасралтгүй вакуум соруулан илүүдэл урвалын бүтээгдэхүүнийг гадагшлуулах горим гэж тогтоов.

Pr:LiYF<sub>4</sub>-ийн оптик шингээлт болон цацаргалтын спектрийн хэмжилтээс энэхүү материал нь үзэгдэх гэрлийн янз бүрийн долгионы уртын мужид цацаргалт хийх боломжтой материал болохыг үзүүлэв.

#### ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажлыг ШУТС-ийн санхүүжилттэй ШУСС-2020/61 суурь судалгааны төслийн хүрээнд МУИС-ийн Лазерын судалгааны төвд гүйцэтгэв.

#### Ашигласан материал

- [1] K.R.Nambiar, Lasers:Principles, Types and Applications, 2006
- [2] R.W.Boyd, Nonlinear Optics (Third Edition), 2008, Pages 1-67
- [3] Y.Yao, K.Xia, M.Kang, Z.Fang, J.Li, Transverse mode transition and LG01-mode generation in an end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser, Chinese Optics Letters. 11. 121406, 2013
- [4] Elena Castellano-Hernández, et al., Efficient directly emitting high-power Tb<sup>3+</sup>:LiLuF<sub>4</sub> laser operating at 587.5 nm in the yellow range Opt. Lett. 43, 4791-4794 (2018)
- [5] F. Cornacchia, A. Toncelli, M. Tonelli, 2- $\mu\text{m}$  lasers with fluoride crystals: Research and development, Progress in Quantum Electronics,33, 2-4,2009, 61-109,
- [6] L. Esterowitz, et al., Blue light emission by a Pr:LiYF<sub>4</sub> laser operated at room temperature, J. Appl. Phys. 48 (1977) 650-652.
- [7] T. Gün, P. Metz, G. Huber, Power scaling of laser diode pumped Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> cw lasers: efficient laser operation at 522.6 nm, 545.9 nm, 607.2 nm, and 639.5 nm, Opt. Lett. 36 (2011) 1002-1004.
- [8] P.W. Metz, et al., High power red, orange, and green Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> lasers, Opt. Lett. 39 (2014) 3193-3196.
- [9] S. Luo, et al., Diode-pumped 915-nm Pr:YLF laser passively mode-locked with a SESAM, Opt. Lett. 26 (2018) 24695-24701.
- [10] P. Zhu, et al., 303 nm continuous wave ultraviolet laser generated by intracavity frequency-doubling of diode-pumped Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> laser, Opt. Laser Technol. 100 (2018) 75-78
- [11] Wang, G. Q., et al. "Environmentally Friendly Growth of Fluoride Crystal LiYF<sub>4</sub>: Pr<sup>3+</sup> with Broadband near-Infrared Emission from 1D2 Manifolds." Journal of Crystal Growth, vol. 520, 2019, pp. 27-32
- [12] R. E. Thoma, et al., Phase Equilibria in the System LiF-YF<sub>3</sub>, J. Phys. Chem. 1961, 65, 7, 1096-1099
- [13] Petricek, V., Dusek, M. Palatinus, L. "Crystallographic Computing System JANA2006: General features"(2014). Z. Kristallogr. 229(5), 345-352.
- [14] Luo, Saiyu, Bin Xu, Shengwei Cui, Han Chen, Zhiping Cai and Huiying Xu. Diode - pumped continuous - wave dual - wavelength c - cut Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> laser at 696 and 719nm, Applied optics 54 34 (2015): 10051.
- [15] Xiang Geng, Li Li, Chen Qian, and Saiyu Luo. Advances in Fluorescence Spectroscopy, Volume 35, S5, 2020