

# Фемто секундын өдөөн судлах спектрометрийн аргыг хагас дамжуулагч материалууд дээр хэрэглэн судласан нь

Б.Өлзийбаяр<sup>1\*</sup>, П.Мөнхбаатар<sup>1</sup>, Ц.Хос-Очир<sup>1</sup>, Ц.Баатарчулуун<sup>2</sup>, Г.Мөнхбаяр<sup>1</sup>,  
Н.Төвжаргал<sup>1</sup>, М.Отгонбаатар<sup>1</sup>, Г.Эрдэнэ-Очир<sup>1</sup>, Ж.Даваасамбуу<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Лазерын судалгааны лаборатори, Физикийн Тэнхим,

Шинжлэх Ухааны Сургууль, МУИС, Улаанбаатар 210646, Монгол Улс

<sup>2</sup> Геологи-Геофизикийн Тэнхим, Шинжлэх Ухааны Сургууль, МУИС, Улаанбаатар 210646, Монгол Улс

Хоёр ялгаатай өдөөн-судлах (ӨС) схемүүдийг өөр өөр фемтосекундын лазерын пульс ашиглан амжилттай хөгжүүлсэн. Хэт-богино пульс лазер ашигласан ӨС схемийг хэрэглэж, хөгжүүлсэн схемийн нарийвчлалыг тодорхойлох болон тохируулга хийх зорилгоор GaAs дахь когерент фононуудын өдөөлтийг хэмжсэн. Энэ когерент фонон давтамжууд нь бусад судлаачдын мэдээллэсэн утгуудтай [1, 2] сайн тохирч байсан. ZnSe болон GaAs-ийг харгалзан нэвтрэлт болон ойлтоор судалсан. ӨС туршилтын дохиог хэт-богино пульс лазер ашигласан үед баланслагч фото диодоор хэмжсэн болно. Өөр нэг ӨС туршилтын схемийн хувьд, ZnSe -ийн нэвтрэлтийн өөрчлөлтийг спектрээс нь хамааруулж хэмжих зорилгоор өмнөх ӨС схемд ашигласнаас өөр лазерын үүсгүүр ба бүртгэгч ашигласан. Спектрээс хамаарсан ӨС туршилтын схемд хүчтэй пульс лазер ашигласан хэмжилт мөн амжилттай болсон. Өргөн зурвастай, өндөр-нягтралтай спектрометрээр (HR4000CG-UV-NIR) бүртгэсэн болно.

PACS numbers: 78.47.J-, 78.66.Db

## I. УДИРТГАЛ

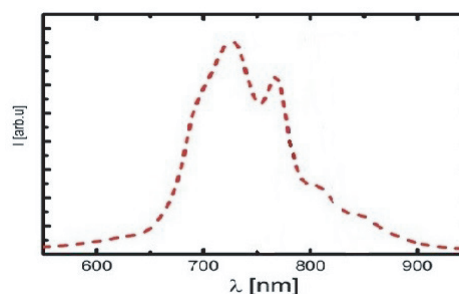
1980аад оны эхэн үеэс хойш олон судалгааны багууд оптик пульс өдөөн-судлах аргыг ашиглан фемтосекундын хугацааны хэмжээтэй /нарийвчлалтай/ оптик пульсээр материал системийн хариу үйлчлэлийг судлаж байна[3, 4]. Эдгээр туршилтын хэд хэдэн тохиолдолд, Раман өдөөх процессоор үүсгэгдсэн хэлбэлзлүүд, хоёр фотоны шингээлт ажиглагдсан. Сүүлийн үед фемтосекундын өдөөн-судлах арга нь металл болон хэт дамжуулагчийн судалгаанд ашиглагдаж байна. Хагас дамжуулагч болон металл материалууд дээр хийсэн хэд хэдэн өдөөн-судлах туршилтанд, дээжийн оптик фонон моодуудтай тохирох давтамжуудтай хэлбэлзлүүд ойлтоор (эсвэл нимгэн дээжээр нэвтрэх нэвтрэлтээр) судлах үед ажиглагдаж байсан [5, 6]. Эдгээр хагас дамжуулагч дээжүүдийн хэлбэлзлүүдийг импульслэг албадмал Раман сарнилыг агуулсан шугаман бус оптик мэдрэх чадвараар тайлбарладаг [7]. Зарим хагас дамжуулагч дээжүүдэд оптик шинж чанарын огцом өөрчлөлт нь хоёр фотоны шингээлтийг агуулсан шугаман бус оптик мэдрэх чадвараар тайлбарладаг [8].

Энэ өгүүлэлт, бид хоёр ялгаатай өдөөн-судлах туршилтын аргын тохируулга хэмжилтийн үр дүнг үзүүлээ. 1-рт, хэт-богино пульс лазертай (6фс-ын үргэлжлэх хугацаатай) өдөөн-судлах туршилтанд ZnSe дахь эгшин зуурын нэвтрэлт, GaAs дахь когерент фононы хэлбэлзлийг хэмжсэн. 2-рт, хүчтэй пульс лазертай (пульсын энерги

нь 1 мЖ) спектрээс хамаарсан өдөөн-судлах туршилтыг ZnSe дээж дээр хийсэн. ZnSe болон GaAs -ийн хувьд өдөөн-судлах туршилтын үр дүн нь бусад судлаачдын үр дүнтэй сайн тохирсон[1, 10].

## II. ТУРШИЛТ 1

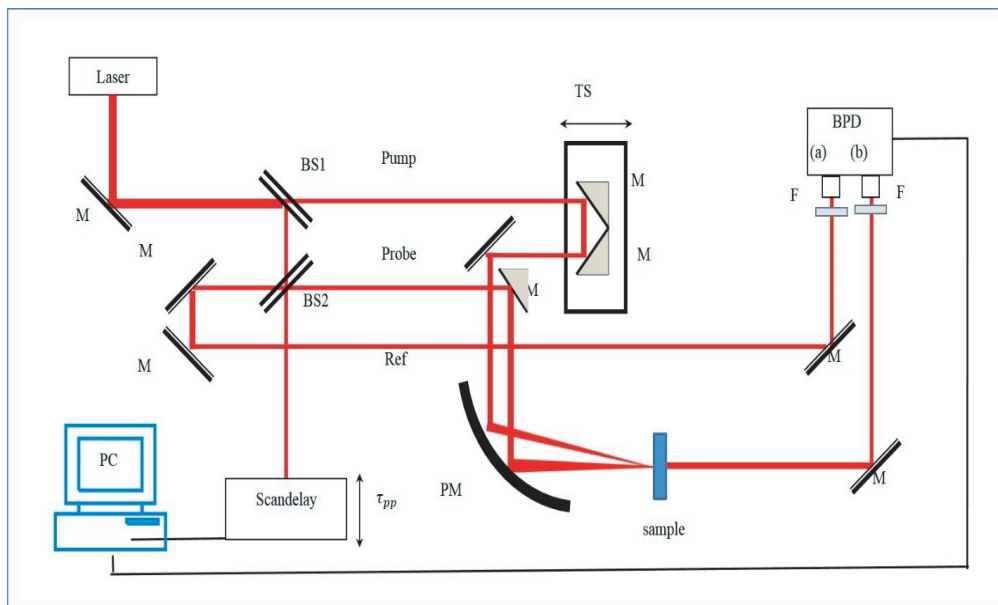
Энэхүү ажлаар хэт-богино пульс лазерыг ашиглан өдөөн судлах туршилтын схемийн тохируулга хийсэн. Туршилтанд ашиглаж байгаа пульс лазерын төв долгионы урт нь 740нм (1.5эВ) байна. Пульсын үргэлжлэх хугацаа 6 фс. Лазерын давталтын хурд нь 75МГц байх үед пульсын энерги нь 4нж. Пульс лазерын спектрийг зураг 1 дээр тасархай шугамаар үзүүлэв.



Зураг 1: Пульс лазерын спектр (Rainbow 2)

Туршилтын схемийг зураг 2-т 2т үзүүлэв. Тусан пульсын 1-р цацраг хуваагч (ЦХ)-аар нэвтэрсэн хэсгийг өдөөгч пульс болгож ашигласан бөгөөд туссан пульсын ойсон хэсэг нь 2-р цацраг хуваагчаар дахин хуваагдсан болно. 2-р цацраг ху-

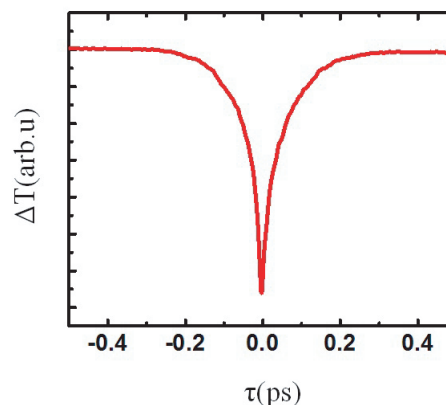
\*Electronic address: ulziibayar@num.edu.mn



Зураг 2: Хэт-богино пульсын лазер (Rainbow 2) ашигласан нэвтрэлт хэлбэрийн өдөөн судлах туршлагын схем. BS - цацраг хуваагч, TS - шилжүүлэгч хавтан, M - толь, Scandelay - хэлбэлзэгч толь, PC - компьютер, PM - парабол толь, Sample - дээж, BPD - баланслагч фото диод

ваагчаар нэвтэрсэн пульс нь судлагч пульсээр, харин түүнээс ойсон пульс нь харьцуулах пульс болон ашиглагдсан. Гараар тохируулж болдог шилжүүлэгч хавтан дээр суурилсан хөдлөгч толь байх бөгөөд түүнээс ойсон өдөөгч пульс нь парабол толины тусламжтайгаар дээж рүү чиглүүлэгддэг. Харин хэлбэлзэгч толиноос ойсон судлагч пульс нь 2-р цацраг хуваагчаас дахин ойх бөгөөд дээж рүү хавтгай болон парабол толиор чиглүүлэгдэнэ. Өдөөгч ба судлагч пульсууд нь дээж дээр парабол толины тусламжтай фокуслагдана. Дээжээр нэвтэрсэн судлагч пульс нь баланслагч фото диод (БФД)-ийн нэг диод руу тусна. Харьцуулагч пульс нь хавтгай толины тусламжтай БФД-ийн нөгөө нэг диод руу тусна. БФД нь лазерын шуугианыг арилгах замаар судлагч болон харьцуулагч пульсуудын хоорондох эрчмийн маш бага ялгаврыг хэмждэг. ЦХ-аар нэвтрэн гарсан өдөөгч пульсыг хаалтаар халхалсан үед БФД дээр бүртгэгдэх дохио "0" байхаар тохируулсан. Ингэснээр өдөөгч пульсээр дээжийг өдөөх үед БФД нь зөвхөн түүгээр үүсгэгдсэн дохиог бүртгэнэ. Энэхүү өдөөгчөөр үүсгэгдсэн дохиог хэлбэлзэгч толь хөдөлж байх явцад хэмжиж авсан. Давтамж нь 1Гц, үр дүнг 100 удаагийн хэмжилтийн дунджаар тодорхойлж байгаа болно.

Туршилтын системийн тохируулга хийхээр ZnSe (хаалттай бүсийн өргөн 2.8 эВ) материал дээр нэвтрэлт хэлбэртэй өдөөн судлах туршилтыг гүйцэтгэсэн. Энэхүү дээж нь туссан пульс лазерын спектрийн мужид тунгалаг байдаг материал юм. Өдөөгч пульс, судлагч пульстай ойр



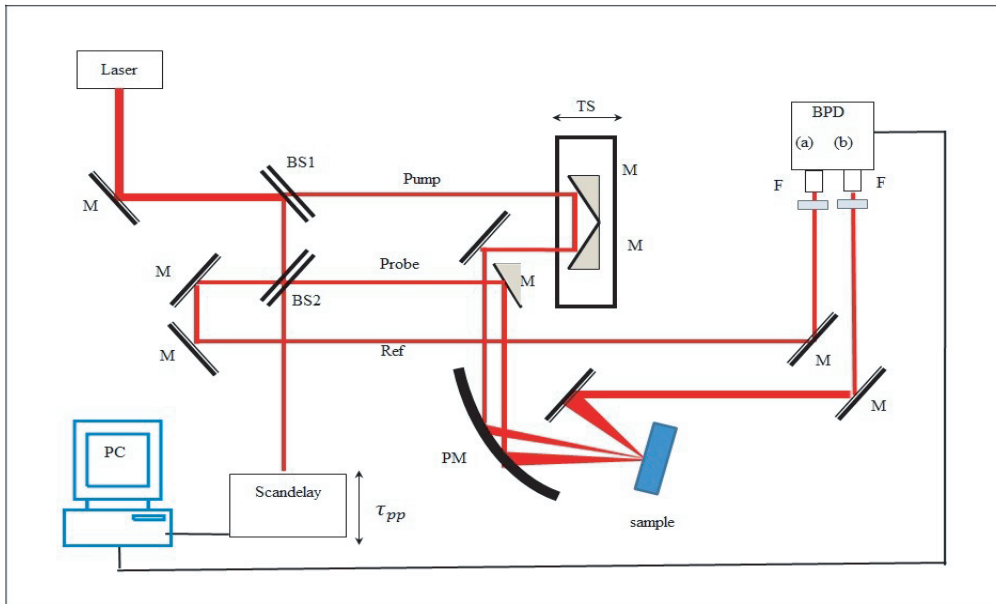
Зураг 3: ZnSe-ийн хувьд хугацаанаас хамаарсан нэвтрэлтийн өөрчлөлт  $\Delta T$

буюу давхцаж байх хугацаанд нэвтрэлтийн өөрчлөлт /зураг 3-т үзүүлсэн/ ажиглагдсан байна.

### III. ТУРШИЛТ 2

Энэхүү ажлаар хэт-богино пульсын лазер (Rainbow 2) ашигласан ойлт хэлбэрийн өдөөн судлах туршлагын схемийг тохируулав. Уг схемийг зураг 4-т үзүүлсэн болно.

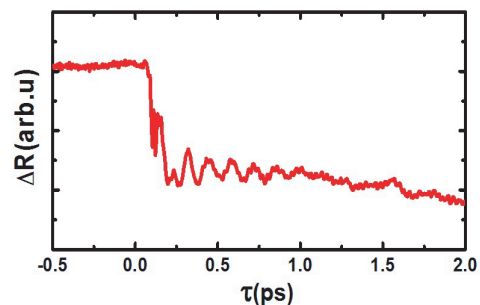
Туссан пульсын 1-р цацраг хуваагчаар нэвтэрсэн хэсгийг өдөөгч пульс болгож ашигласан бө-



Зураг 4: Хэт-богино пульсын лазер (Rainbow 2) ашигласан ойлт хэлбэрийн өдөөн судлах туршлагын схем. BS - цацраг хуваагч, TS - шилжүүлэгч хавтан, Sample – дээж, M - толь, Scan delay - хэлбэлзэгч толь, PM - парабол толь, BPD - баланслагч фото диод, PC - компьютер

гөөд туссан пульсын ойсон хэсэг нь 2-р цацраг хуваагчаар дахин хуваагдсан болно. 2-р цацраг хуваагчаар нэвтэрсэн пульс нь судлагч пульсээр, харин түүнээс ойсон пульс нь харьцуулах пульс болон ашиглагдсан. Гараар тохируулж болдог шилжүүлэгч хавтан дээр суурилсан байх хөдлөгч толинуудаас ойсон өдөөгч пульс нь парабол толины тусламжтайгаар дээж рүү чиглүүлэгддэг. Харин хэлбэлзэгч толиноос ойсон судлагч пульс нь 2-р цацраг хуваагчаас дахин ойх бөгөөд дээж рүү хавтгай болон парабол толиор чиглүүлэгдэнэ. Өдөөгч ба судлагч пульсууд нь дээж дээр парабол толины тусламжтай фокуслэгдана. Дээжийн гадаргуугаас ойсон судлагч пульс нь хавтгай толиор чиглүүлэгдэн БФД руу тусна. Харьцуулагч пульс нь хавтгай толины тусламжтай БФД-ийн нөгөө нэг диод руу тусна. БФД нь лазерын шуугианыг арилгах замаар судлагч болон харьцуулагч пульсуудын хоорондох маш бага ялгаврыг хэмжих боломжтой байдаг. Мөн БФД нь судлагч болон харьцуулагч пульсуудын хоорондох эрчмийн ялгаврыг хэмжих боломжтой байдаг. Схемийг өдөөгч пульс нь хаалтаар халхлагдсан үед БФД дээр бүртгэгдсэн дохио “0” байхаар тохируулсан байна. Ингэснээр өдөөгч пульсээр дээжийг өдөөх үед БФД нь зөвхөн түүгээр үүсгэгдсэн дохиог бүртгэнэ. Энэхүү өдөөгчөөр үүсгэгдсэн дохиог хэлбэлзэгч толь хөдөлж байх явцад хэмжиж авсан.

Туршилтын системийг тохируулахаар GaAs (хаалттай бүсийн өргөн 1.5 эВ) материал дээр ойлт хэлбэртэй өдөөн судлах туршилтыг гүйцэт-

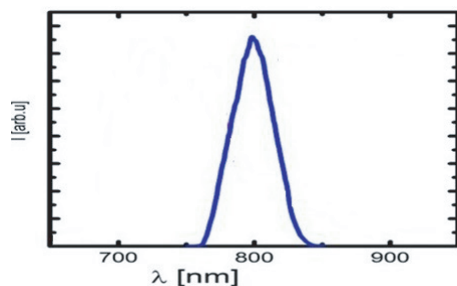


Зураг 5: GaAs-ийн хугацаанаас хамаарсан ойлтын өөрчлөлт  $\Delta R$

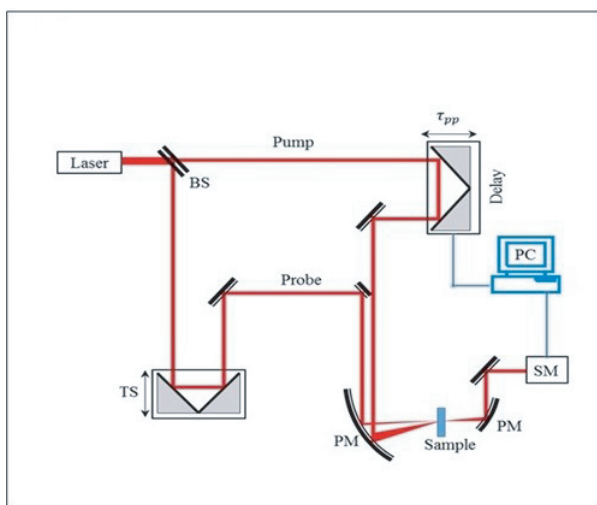
гэсэн. Системийн үр дүн нь бага далайцтай когерент хэлбэлзлүүдийг харуулж байна. Давамгайлагч хэлбэлзэл нь 8.8 ТГц-ийн давтамжтай байсан бөгөөд энэ нь бусад туршилтын ажлын мэдээлэгдсэн утгуудтай сайн тохирч байна. Энэ нь зураг 4-т үзүүлсэн схем горимоороо зөв ажиллаж байгааг баталж байна.

#### IV. ТУРШИЛТ 3

ZnSe кристалл дээж дээр өдөөгч болон судлагч пульсуудын спектрийн нэвтрэлтийн өөрчлөлтийг янз бүрийн хугацааны хоцрогдолтой хэмжихийн тулд хүчтэй пульс лазер (Solstice Ace) ашигла-



Зураг 6: Хүчтэй пульс лазерын спектр (Solstice ACE)

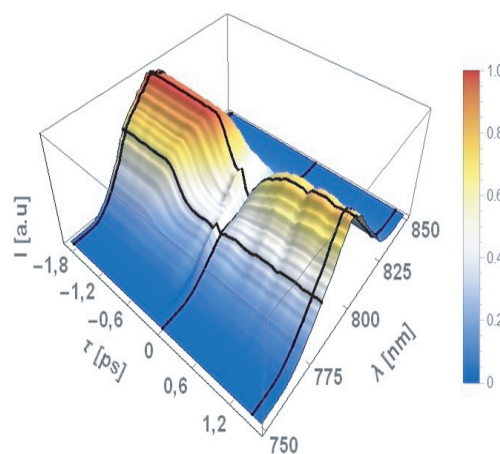


Зураг 7: Хэт хурдан өсгөгч систем (Solstice Ace) ашиглан спектрээс хамаарсан өдөөн судлах туршилтын схем. BS - цацраг хуваагч, TS - шилжүүлэгч хавтан, M - толь, delay - моторт шилжүүлэгч хавтан, SM - спектрометер, PM - парабол толь, Sample - дээж, PC - компьютер

сан спектрээс хамаарсан өдөөн судлах туршилтыг хийсэн юм. Хэт хурдан өсгөгч систем (Solstice Ace) ашиглан спектрээс хамаарсан өдөөн судлах туршилтыг тохируулсан байгааг зураг 7-д үзүүлэв. Пульс лазерын төв долгионы урт нь 800нм (1.5эВ) байна. Пульсын үргэлжлэх хугацаа 120 фс (35-120фс-ийн хооронд гараар тохируулах боломжтой). Лазерын давталтын хурд нь 5кГц байх үед пульсын энерги нь 1.6мЖ буюу хүчтэй пульс энерги байна. Пульс лазерын спектрийг зураг 6 дээр үргэлжилсэн шугамаар үзүүлэв.

Энэ туршилтын ажлын хувьд туссан пульс нь цацраг хуваагчаар хуваагдана. ЦХ-аар нэвтэрсэн пульс нь өдөөгч пульс болон ашиглагдана. Энэхүү өдөөгч пульс нь компьютероос удирдагддаг, моторт шилжүүлэгч хавтан дээр суурилсан хөдлөгч толинууд руу тусах ба дээж рүү хавтгай болон парабол толиор чиглүүлэгдэнэ. ЦХ-аас ойсон пульс нь гараар тохируулдаг шилжүүлэгч хавтан дээр

суурилсан толинд ойх бөгөөд хоёр хавтгай болон парабол толиор дээж рүү чиглүүлэгдэнэ. Өдөөгч болон судлагч пульсууд нь дээж дээр фокуслагдана. Судлагч пульс нь дээжийн гадаргууд эгц тусах ба өдөөгч болон судлагч пульс хоорондох өнцөг нь ойролцоогоор 4° болно. Дээжээр нэвтэрсэн өдөөгч пульс нь хоёр дахь парабол толиноос ойсны дараагаар хаалтаар халхлагдана. Дээжээр нэвтэрсэн судлагч пульсыг цуглуулж спектрометер рүү илгээхийн тулд өөр нэг парабол толь ашигладаг. Өдөөгч пульстай харьцангуй судлагч пульсын хугацааны хоцрогдлыг өөрчлөхийн тулд шилжүүлэгч хавтан хөдлөж байх үед судлагч пульсын эрчмийг спектрометрээр хэмжсэн. Дээж (ZnSe)-ийн өдөөгчөөр өдөөгдсөн спектрийн нэвтрэлтийн өөрчлөлт нь зураг 8-д үзүүлсэн эрчмийн хэмжилтээс харагдана.



Зураг 8: Хэт хурдан өсгөгч систем (Solstice Ace) ашиглан спектрээс хамаарсан өдөөн судлах туршилтын схем. BS - цацраг хуваагч, TS - шилжүүлэгч хавтан, M - толь, delay - моторт шилжүүлэгч хавтан, SM - спектрометер, PM - парабол толь, Sample - дээж, PC - компьютер

ZnSe кристалл дээж дээр өдөөгч болон судлагч пульсуудын спектрийн нэвтрэлтийн өөрчлөлтийг янз бүрийн хугацааны хоцрогдолтой хэмжихийн тулд мөн л хүчтэй пульс лазер (Solstice Ace) ашигласан спектрээс хамаарсан өдөөн судлах туршилтыг хийсэн юм. Пульсын спектрийн мужид тунгалаг байдаг /нэвтрүүлэгч/ ZnSe кристалл нь өдөөгч пульс судлагч пульстай давхцах хугацаанд шингээгч шинж чанартай болж байсан. Иймд энэхүү дээж нь хоёр фотоны шингээлтийг судлахад таатай материал юм. ZnSe дээжийн хаалттай бүсийн өргөн (2.8эВ, [11]) нь пульс лазерын төв давтамжийн энергийн фотоноосойролцоогоор хоёр дахин их учраас энэ нь хоёр фотоны шингээлтийн процесс байж болно [10, 12].

## V. ДҮГНЭЛТ

Бид өдөөн-судлах туршилтын схемийг хүчтэй пульс лазер (Solstice Ace) болон хэт-богино пульс лазер (Rainbow 2)-ын оролцоотой хөгжүүлсэн болно. Эдгээр хөгжүүлсэн схемээ шалгах болон тохируулга хийх зорилгоор GaAs дахь когерент фононуудын өдөөлт ба өдөөгчөөр өдөөгдсөн нэвтрэлтийн өөрчлөлтийг хэмжсэн. Уг хөгжүүлсэн схемийг ашиглан хэмжсэн үр дүн маань энэ төрлийн бусад судалгааны ажлын мэдээлэгдсэн утгуудтай нийцэж байгаа явдал нь пульс лазерууд болон туршилтын схем маань цаашдын судалгаанд хэ-

рэглэх боломжтойг харуулж байна. Пульс лазерууд нь когерент хэлбэлзэл, дээд эрэмбийн шугаман бус эффект, аттосекундын пульс үүсгэх болон терагерцийн долгион үүсгэх зэрэг үзэгдлийг судлахад хэрэглэх боломжтой.

## ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажил нь ШУТС (Grants No. SSA 014/2016, SSA 017/2016), МУИС-ийн зочин судлаач төсөл (code P2017-2407)-ийн дэмжлэгтэйгээр хийгдэв.

- 
- [1] G. C. Cho, W. Kutt and H. Kurz, Phys. Rev. Lett. **65**, 764 (1990).
  - [2] S. Adachi, J. Appl. Phys. **58**, R1 (1985).
  - [3] E. P. Ippen and C. V. Shank, Ultrashort Light Pulses, edited by S. L. Shapiro (Springer-Verlag, Berlin, 1984).
  - [4] C. B. Harris, E. P. Ippen, G. A. Mourou, and A. H. Zewail, Ultrafast Phenomena Springer-Verlag, Berlin (1990).
  - [5] H. J. Zeiger, J. Vidal, T. K. Cheng, E. P. Ippen, G. Dresselhaus, and M. S. Dresselhaus, Phys. Rev. **B 45**, 768 (1992).
  - [6] S. De Silvestri, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, E. B. Bamble, L. R. Williams, and K. A. Nelson, Chem. Phys. Lett. **116**, 146 (1985).
  - [7] M. J. Rosker, F. W. Wise, and C. L. Tang, Phys. Rev. Lett. **57**, 321 (1986).
  - [8] J. M. Chwalek, C. Uher, S. F. Whitaker, G. A. Mourou, and J. A. Agostinelli, Appl. Phys. Lett. **58**, 980 (1991).
  - [9] H. Kurz, QELS Digest 11, **58** (1991).
  - [10] J. Shen, Z. Zhang, and Z. Hua, Appl. Phys. Lett. **88**, 011113 (2006).
  - [11] D. J. Chadi, Phys. Rev. Lett. **72**, 534 (1994).
  - [12] X. Wan, X. Yao, M. Wang, and H. Hao, J. Electroceramics **21**, 737 (2008).