

Тунгалаг материалаар (ZnSe) нэвтрэх гэрлийн хүчтэй лазераар үүсгэгдсэн спектрал фазын өөрчлөлтийг судлах интерферометрийн арга

Ц. Хос-Очир*, П. Мөнхбаатар, Ц. Баатарчулуун, Ж. Даваасамбуу

Монгол Улсын Их Сургууль, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Физикийн тэнхим

Туссан гэрлийн спектрийн мужид тунгалаг материал (ZnSe) дундуур нэвтрэх судлагч (probe) лазер пульст өдөөгч (pump) пульсыншугаман бус процессийн улмаас үүссэн спектрал фазын өөрчлөлт (СФӨ)-ийг судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацаа (time delay)-аас хамааруулж хэмжих интерферометрийн аргыг өдөөн-судлах (pump-probe) техниктэй хослуулах аргыг боловсруулсан. СФӨ-ийг хэмжигдсэн интерферограмаас Фурье хувиргалтын аргыг хэрэглэн гаргаж авсан. СФӨ-ийг онолоор тооцоолж симуляцийг хос фотоны шингээлт (two photon absorption)-ийн тохиолдолд хийсэн нь туршлагын үр дүнтэй маш сайн таарсан.

PACS numbers: (120.3180) Interferometry, (300.6300) Spectroscopy, Fourier transforms, (300.6500) Spectroscopy, time-resolved, (190.7110) Ultrafast nonlinear optics

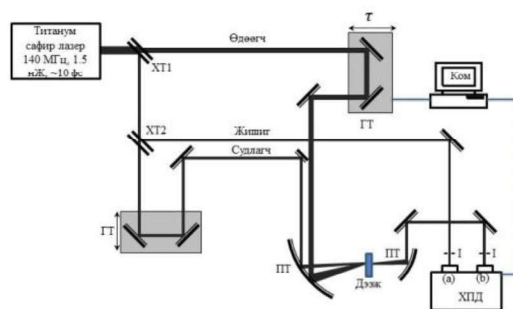
I. ОРШИЛ

Өдөөн-судлах арга (pump-probe method)-ыг интерферометртэй нэгтгэснээр уламжлалт өдөөн-судлах аргаас олон давуу талуудыг олж харна. Энэ нь электроник, фотоник, биологи гэх мэт олон салбар дахь оптикийн хэт түргэн (Ultrafast) үзэгдлийг илүү нарийн судлах, бодисын микро бүтцийн гүн рүү өнгийн харах боломжийг олгодог [1,2]. Хугацааны хувьд маш богино лазер пульс дээж дундуур нэвтрэх эсвэл дээжийн гадаргаас ойх үед гэрэл нь дээжийн атом молекулууд харилцан үйлчилсний улмаас дээжийн шугаман болон шугаман бус оптик шинж чанар өөрчлөгддөг. Уламжлалт өдөөн-судлах арга нь материал дундуур нэвтрэсэн гэрлийн (пульсын) нэвтрэлтийн коэффициентийн өөрчлөлт (ΔT)-ийг судалдаг. Энэ ΔT нь гэрлийн давтамжийн хувьд интегралчлагдсан хэмжигдэхүүн юм. Давтамжаас хамаарсан нэвтрэлтийн коэффициентийн өөрчлөлт ($\Delta T(\omega)$) буюу спектрал нэвтрэлтийн коэффициентийн өөрчлөлт (СНКӨ) нь диэлектрик мэдрэх чадвар ($\chi(\omega)$ –(susceptibility)-ын зөвхөн хуурмаг хэсгийн мэдээллийг өгнө [3]. Шугаман бус тухайлбал гуравдугаар эрэмбийн шугаман бус оптик диэлектрик мэдрэх чадвар ($\chi^{(3)}(\omega)$) нь комплекс хэмжигдэхүүн бөгөөд түүний талаарх бүрэн мэдээллийг судлахын тулд $\chi^{(3)}(\omega)$ -ийн хуурмаг (imaginary) хэсгийн мэдээллийг өгөх давтамжаас хамаарсан СНКӨ ($\Delta T(\omega)$) болон $\chi^{(3)}(\omega)$ -н бодит (real) хэсгийн мэдээллийг өгөх давтамжаас хамаарсан спектрал фазын

өөрчлөлт(СФӨ ($\Delta\phi(\omega)$)-ийг нэгэн зэрэг хэмжиж болох тусгай арга зайлшгүй шаардлагатай болдог. Дээж дундуур нэвтрэсэн гэрлийн хувьд хугацаанаас хамаарсан СНКӨ ба СФӨ-ийг хэмжих интерферометрт нэгтгэсэн өдөөн-судлах цөөн тооны судалгаа сүүлийн үед хийгдээд байна [1,3]. Эдгээрийн нэг болох Tokunaga-ийн баг судлагч болон жишиг (reference) пульсын тархах чиглэл (а) коллинар ба (б) коллинар биш байх хоёр туршлагын схем танилцуулсан [1]. Коллинар байх тохиолдол нь тохиргоо хийхэд хялбар, судлагч болон жишиг импульсууд ижил оптик элементүүдийг нэвтрэх учир оптик замууд нь ижил тиймээс интерференцийн харагдац (fringe visibility) нь сайн, судлах дээжээ солих тохиолдолд судлагч болон жишиг пульсын оптик замын дахин тохиргоо хийх шаардлагагүй, судлагч ба жишиг пульсын аялах зам (arm)-ын урт богино учир оптик элементүүдийн чичиргээнээс үүсэх нөлөө бага, харьцангуй тогтвортой зэрэг олон давуу талуудтай болохыг дурьджээ. Эдгээр давуу талуудаас гадна коллинар геометр бүхий схем нь мөн сул талуудтай. Нэг ноцтой сул тал бол судлагч ба жишиг пульсын хоорондох хоцрох хугацаа (T)-ын хязгаар юм. Дээж дундуур нэвтрэсэн өдөөгч, судлагч, жишиг гурван пульсын хувьд жишиг пульс заавал түрүүлж дээжийг нэвтрч байх ёстой. Энэ нөхцөл биелээгүй тохиолдолд өдөөгч пульсын дээжид үүсгэсэн өөрчлөлт нь хоцорч ирэх жишиг пульст нөлөөлөх болно. Иймээс судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацаа (τ), судлагч пульсын жишиг пульсаас хоцрох хугацаа (T)-ны

* Electronic address: ts_khos@yahoo.com

хооронд “ $\tau < T$ ” нөхцлийг үргэлж биелүүлж байх хэрэгтэй. Tokunaga-ийн баг 60 фс хугацааны өргөнтэй, 620 нм төв долгионы урттай, 10 кГц давталт (repetition rate) бүхий лазер пульс хэрэглэсэн нь тэдний пульсын когерент урт харьцангуй их учир дээрх нөхцөл биелүүлэхэд хялбар болно. Ерөнхий тохиолдолд, хоцрох хугацаа T нь спектрометрийн нарийвчлал эсвэл хоёр пульсын когерент уртаар дээрээсээ хязгаарлагдана [4-6]. Харин доод хязгаар нь, хэмжигдсэн давтамжаас хамаарсан интерферограмыг Фурье хувиргалтаар хугацааны огторгуй руу хөрвүүлэхэд уг огторгуйд интерферограмын тогтмол болон хэлбэлзэх хэсэг харгалзах сигнал (peak)-ийн салалт нь интерференцид орж буй пульсуудын хоцрох хугацаа (T)-гаар тодорхойлогдоно (IV бүлгээс дэлгэрүүлж харна уу). Мөн түүнчлэн лазер системд богино (хэдэн фемтосекунд) пульсын хоцрох хугацааны хязгаарын муж ба когерент урт бага, харин харьцангуй урт (хэдэн зуун фемтосекунд эсвэл пикосекунд) пульсын хоцрох хугацааны муж ба когерент урт их байна. Өндөр давталт бүхий лазер пульс хэмжилтэнд ашиглах үед дулааны эффектийн улмаас өдөөх пульсыг халхлах замаар хэмжилт хийх боломжгүй юм. Эдгээр шинж чанараас хамаарч бидний туршилтанд (а) коллинар тохиолдлыг ашиглах нь тохиромжгүй хэмээн үзсэн. Иймд (б) коллинар биш тохиолдлыг хөгжүүлэх шаардлага тавигдсан болно. Бид энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацаанаас хамаарсан судлагч пульсын СФӨ-ийг тодорхойлох Мах-Зандерийн интерферометрт өдөөн-судлах аргийг нэгтгэсэн системийг хөгжүүлсэн. Энэхүү аргаар тунгалаг дээж (ZnSe) дундуур нэвтрэх судлагч пульсын өдөөгч пульсаар үүсгэгдсэн СФӨ-ийг богино лазер пульс (~10 фс) ашиглан судалсан. Туршилтын схем болон хэмжилт нь харгалзах хэсгүүдэд дэлгэрэнгүй тайлбарлагдсан. Манай туршилтанд өдөөгч пульсын нөлөөгүй хэмжилт хийхийн тулд өдөөгч пульсыг хаах халхавч хэрэглэгдээгүй. Хэрэв туршилтанд халхавч хэрэглэвэл өдөөгч пульсыг халхалсан болон халхлаагүй үеийн дээжийн температур нь ялгаатай байх болно. Энэ нь хэмжилтийн үр дүнд нөлөөлөх сул талтай. Туршилтанд ашигласан пульсын давталт 140 МГц тул халхавч ашиглаагүй үед дээжийн температурыг тогтмол гэж үзэх боломжтой.



Зураг 1. Өдөөгч ба судлагч пульсын орон зайн болон хугацааны давхцыг тохируулах туршилагын схем. XT1- (70:30) 70%-ийн нэвтрүүлэгч, 30%-ийн ойлгогч хагас толь ба XT2- (50:50) хагас толь, ПТ-парабол толь, ГТ-гүйгч тавцан ба ХПД – хос фото диод

Өдөөгч пульсын дээж болон судлагч пульст үзүүлэх нөлөөг багасгахын тулд өдөөгч пульсыг судлагч пульсаас хол хоцроож ($\tau = -340$ фс) эхний хэмжилтийг хийсэн. Тохиромжтой интерферограм үүсгэхийн тулд судлагч пульсын жишиг пульсаас хоцрох хугацааг ~100 фс байхаар сонгож авсан. Фурье хувиргалтын спектрал интерферометр аргыг ашиглан, шугаман бус процессийн үр дүнд үүссэн судлагч пульсын спектрал фазын өөрчлөлт ($\Delta\phi(\omega, \tau)$)-ийг гаргаж авсан [13,14]. Туршилтаар ZnSe-ийн хувьд спектрал фаз өөрчлөгдөж байгааг илрүүлж үр дүнг хоёр хэмжээст диаграммаар үзүүлэв. Энэ үр дүн нь гуравдугаар эрэмбийн шугаман бус процесс болох хос фотоны шингээлтээр тайлбарлагдсан. Уг онолын тооцоо туршилагын үр дүнтэй маш сайн нийцсэн болно.

II. ТУРШЛАГЫН СХЕМ

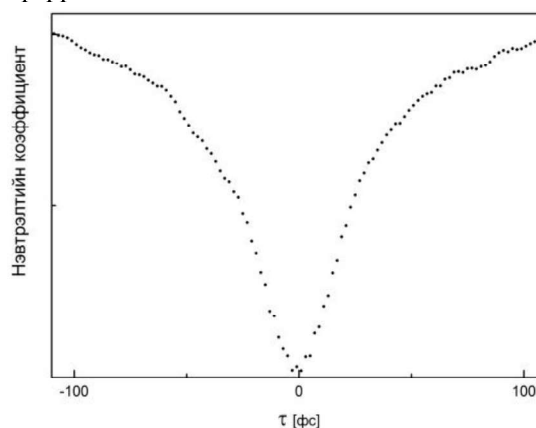
Туршилтанд, лабораторын нөхцөлд угсарсан титаниум сафир (Ti:sapphire) лазер пульс ашиглагдсан [7]. Пульсын төв долгионы урт нь 800 нм (1.5 эВ), пульсын хугацааны өргөн нь ~10 фс болно. Пульсын давталт 140 МГц, нэг пульсын энерги ~1.5 нЖ. Лазер пульсын хугацааны болон орон зайн давхцыг тохируулах туршилтын схемийг Зураг 1-т үзүүлэв. Хагас толь (beam splitter) (75:25) (XT1) түүн дээр туссан лазер пульсыг хоёр хуваана. XT1-ээр нэвтэрсэн (75%) лазер пульс нь өдөөгч пульс, XT1-ээс ойсон (25%) лазер пульс хоёр дахь хагас толь (XT2) (50:50)-оор хуваагдаж, нэвтэрсэн ба ойсон хэсгүүд харгалзан судлагч ба жишиг пульс болон нэрлэгдсэн. Өдөөгч пульс компьютероос удирдах боломжтой шулуун гүйгч тавцан (ГТ) (translation stage) дээр бэхэлсэн хос толиноос ойж туссан чиглэлтэйгээ параллелиар хэвтээ хавтгайд буцаж

тархана. Түүнчлэн хавтгай болон парабол толиор чиглүүлэгдсэн өдөөгч пульс дээж дундуур нэвтрэнэ. Судлагч пульс гар удирдлагатай ГТ дээр бэхлэгдсэн хос толиноос ойж, хавтгай болон парабол толиор мөн чиглүүлэгдэж дээж дундуур нэвтрэнэ. Өдөөгч болон судлагч пульсуудыг парабол тольны тусламжтайгаар дээжийн нэг цэгт фокуслана. Өдөөгч пульсын дээжид үүсгэсэн шугаман бус процессийн улмаас судлагч пульсын спектрал фаз өөрчлөгдөх ба энэ өөрчлөлт нь эдгээр пульсын хоорондын хугацааны хоцрогдолоос хамаарна. Дээж дээрх фокусласан гэрэлт толбоны диаметр ~ 100 мкм. Судлагч пульс дээжний гадаргууд перпендикуляр тусах ба өдөөгч пульс нь судлах пульстай ойролцоогоор 8° өнцөг үүсгэн тусна. Дээж дундуур нэвтрэсэн өдөөгч пульс хоёр дахь парабол толиноос ойсны дараагаар халхлагдсан. Харин судлагч пульс дээж дундуур нэвтрээд хоёр дахь парабол толь болон хавтгай толиноос дараалан ойж гэрэл бүртгэгч хос диод (balanced photo diode)-ний нэг (b) диодод бүртгэгдэнэ. Харин жишиг гэрэл бүртгэгч хос диодны нөгөө (a) диодод бүртгэгдэнэ.

а. Дээж дээр фокуслаж байгаа өдөөгч ба судлагч пульсын орон зайн болон хугацааны давхцалыг тохируулах

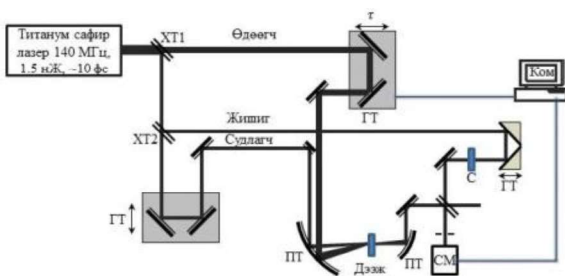
Өдөөгч ба судлагч пульсын тохиргоо хийхдээ CCD камер, шугаман бус кристалл (BBO), спектрометр зэргийг ашигласан. Өдөөгч болон судлагч пульсуудыг нэг цэгт (орон зайн) давхцуулахын тулд дээжийн байрлалд CCD камер тавьж, парабол толиноос ойсон пульс цацрагуудын фокусын цэгүүд (beam waist) давхцаж байх нөхцлийг хангах ба энэ цэгт дээжээ буцаан байрлуулах болно. Дараа нь пульсуудын хугацааны давхцыг тааруулахын тулд фокусын цэгийн орчим спектрометр байрлуулж тэдгээрийн үүсгэх интерференцийн хэлбэрээр хоцрох хугацааг ойролцоогоор сонгож тохируулна. Дээрх тохиргоог шалган баталж, сайжруулахын тулд шугаман бус кристалл ашиглан түүн дээр туссан хоёр пульсын орон зай, хугацааны давхцал сайн болох үед тэдгээр пульсуудын дундаас шинээр үүсэх хоёрдогч гармоник цацрагын эрчим өндөр байх чанарыг ашиглана. Тохиргоо хамгийн сайн болох үед дараагийн хэмжилтэндээ бэлдэх, пульсуудын хоцрох хугацааны тэг цэгийг тодорхой болгох үүднээс өдөөгч пульсыг түүний буцаж ойлгох хос толийг бэхэлсэн гүйгч тавцанг алхам алхмаар хөдлөх үед хэмжилтийг гүйцэтгэнэ. Хөдөлгөх мотор нь гүйгч тавцанг -

30 мкм (100 фс)-ээс 30 мкм (100 фс) хүртэл ($1/3$ фс алхамтайгаар) хөдөлгөж жишиг болон судлагч пульсын эрчмийн ялгаврыг гэрэл бүртгэгч хос диодоор бүртгэсэн. Судлагч пульс нь дээжээр нэвтэрсэн пульсын эрчмийг илэрхийлэх бол жишиг пульс нь ХТ2-р тэнцүү хуваагдсан учир дээж дээр тусаж буй пульстэй ижил байна. Өөрөөр хэлбэл жишиг пульс нь дээж дээр туссан пульсыг төлөөлнө. Туссан (I_T) ба нэвтэрсэн (I_H) пульсын эрчмийг ашиглан пульсын давтамжаар интегралчлагдсан нэвтрэлтийн коэффициентийн өөрчлөлт $\Delta T \sim (I_T - I_H)/I_T$ гэж томъёолж болно. ΔT нь дээжид зөвхөн өдөөгч пульсаар үүсгэгдсэн шугаман бус процессын талаарх мэдээллийг өгнө. Энэ нь уламжлалт өдөөн-судлах арга юм. Туршлагад цайр-селени (ZnSe[100])-ийг дээж болгон ашигласан. Хэмжилтийн үр дүнг Зураг 2-т үзүүлэв.



Зураг 2. ZnSe кристаллын хувьд судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацаанаас хамаарсан нэвтрэлтийн коэффициент.

Хэмжилт нь өдөөгч пульсын оптик замыг өөрчлөгч гүйгч тавцангийн нэг бүтэн шилжилтэнд гүйцэтгэгдсэн. Энэ нь өдөөгч пульсаар үүсгэгдсэн нэвтрэлтийн өөрчлөлт хүчтэй ба тодорхой байгааг харуулж байна. Хэмжилтээс харахад, өдөөгч пульс хоцорсон байрлалаас судлагч пульс руу ойртох үед ($\tau < 0$) материалыг нэвтэрсэн судлагч пульсын эрчим буурч байна. Пульсууд давхцах буюу хоцрох хугацаа тэг болоход ($\tau = 0$) нэвтэрсэн судлагч пульсын эрчим хамгийн бага (графикийн минимум цэг) болно. Тэг цэг мөн болохыг шугаман бус кристалаар үүсгэгдэх хамгийн хүчтэй дохиог хэмжих замаар шалгасан. Өдөөгч пульс судлагч пульсаас түрүүлэх үед ($\tau > 0$) нэвтэрсэн пульсын эрчим ихсэж байна.



Зураг3. Спектрал фазын өөрчлөлтийг судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацаанаас хамааруулж хэмжих интерферометрийн туршлагын схем. ХТ1- (70:30) 70%-ийн нэвтрүүлэгч, 30%-ийн ойлгогч хагас толь ба ХТ2-50:50хагас толь, ПТ-парабол толь, ГТ-гүйгч тавцан, С-фаз компенсатор, баСМ – дифракцын спектрометр.

б. Спектрал фазын өөрчлөлтийг хэмжих өдөөн-судлах интерферометрийн арга

Дээжид өдөөгч пульсаар үүсгэгдсэн өөрчлөлтөөс шалтгаалж түүгээр нэвтрэх судлагч пульсын фазын өөрчлөлтийг судлах интерферометрийн аргын туршлагын схемийг Зураг 3-т үзүүлэв. Схемийн эхний хэсэг Зураг 1-т тайлбарлагдсан болно. Гүйгч тавцан дээр бэхлэгдсэн толиноос ойсон жишиг пульс дээжтэй ижил материал(ZnSe) дундуур нэвтрэнэ. Энэ нь судлагч пульсын фазын бага өөрчлөлтийг мэдрэхийн тулд жишиг ба судлагч пульсын фазыг ижилсгэж байгаа хэрэг юм. ХТ3 руу чиглэн тархах судлагч ба жишиг пульсууд ХТ3 дээр интерференцид орно. Хамгийн тохиромжтой интерферограмыг жишиг пульсын тархах мөрийн уртыг өөрчлөх замаар үүсгэнэ. Мөрүүдийн уртын ялгаа ойролцоогоор ~30 мкм үед хэмжилт хийгдсэн.

III. ТУРШЛАГЫН ХЭМЖИЛТ

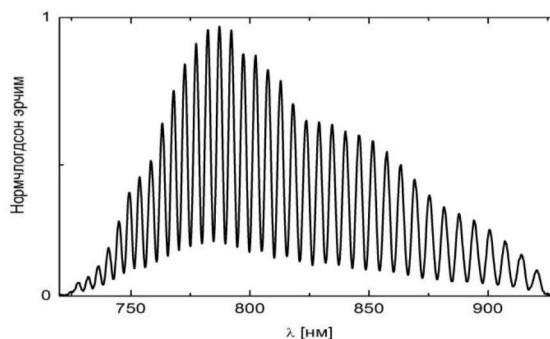
Судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацаа (τ)-ны тодорхой нэг уясан утганд судлагч ба жишиг пульсуудыг үүсгэх интерферограмыг дифракцын спектрометр ашиглан долгионы уртын огторгуйд хэмжсэн. Уг интерферограмыг Зураг 4-т үзүүлэв. Хоцрох хугацаа (τ)-ны ялгаатай хэд хэдэн утганд интерферограмыг давтан хэмжив. Эхний хэмжилт өдөөгч пульс судлагч пульсаас хол хоцорсон ($\tau = -340$ fs) үед гүйцэтгэгдсэн бол 2-р хэмжилтээс ($\tau = -100$ fs) 12-р хэмжилт ($\tau = 100$ fs) хүртэлх хэмжилтүүдийн хоцрох хугацааг ижил 20 fs алхамтайгаар ихэсгэн хэмжсэн. Сүүлийн хэмжилт нь өдөөгч пульс судлагч пульсаас хол түрүүлсэн ($\tau = -340$ fs) үед гүйцэтгэгдсэн. Бүх хэмжилтийг тухайн цэгт

бэхлэгдсэн байх үед 10 удаа давтан хийж дундаж утгыг авсан.

IV. АНАЛИЗ

Цахилгаан соронзон долгион далайц болон фазаар бүрэн тодорхойлогддог. Интерференцид орж буй судлагч болон жишиг импульсуудын хувьд түүний далайцыг харилцан үл хамааралтайгаар нэгийг нь халхлах замаар нөгөөг нь гэх мэт хоёуланг хэмжиж болно. Харин фазын мэдээллийг хэмжихийн тулд илүү чамин арга хэрэгтэй. Судлагч импульсын фазын мэдээлэл нь түүний далайцын мэдээллээс илүү сонирхолтой юм. Судлагч ба өдөөгч импульсуудын үүсгэх интерферограм тэдгээрийн хоорондох оптик замын ялгаагаар хэлбэржинэ. Оптик замын ялгаа нь интерференцид орж буй цацрагуудын фазын зөрөөг тодорхойлно. Хэмжигдсэн интерферограмаас фазын мэдээллийг ялгаж авахдаа Фурье хувиргалтын спектрал интерферометрийн аргыг хэрэглэсэн [8,9]. Энэ аргын товч тайлбарыг доор оруулав. Ихэнх туршилтанд спектрийг долгионы уртаас хамааруулж, дифракцын спектрометрээр хэмждэг. Харин давтамжаас хамаарсан спектр математик хувиргалтын хувьд илүү тохиромжтой. Иймд давтамжийн огторгуйд цахилгаан орон дараах байдлаар тодорхойлогдоно:

$$E(\omega) = \sqrt{S(\omega)} \cdot \exp[-i\phi(\omega)] \quad (1)$$



Зураг 4. Өдөөгч пульс судлагч пульсаас хол хоцорсон байх үед дифракцын спектрометрээр хэмжигдсэн судлагч ба жишиг импульсуудыг үүсгэх интерферограм

Энд, $S(\omega)$ пульсын спектрал эрчим, $\phi(\omega)$ пульсын спектрал фаз болно. Хугацааны хувьд хоорондоо харьцангуй хоцрогдолтой лазер импульсууд интерферограм үүсгэнэ. Энэ интерферограм нь математикийн хувьд дараах байдлаар томъёологдоно:

$$S(\omega) = |E_r(\omega)|^2 + |E_{pr}(\omega)|^2 + 2\text{Re}[E_r^*(\omega)E_{pr}(\omega)]. \quad (2)$$

Энд эхний хоёр гишүүн нь жишиг болон судлагч импульсын харилцан хамааралгүй спектрал эрчим, сүүлийн гишүүн нь фазын ялгаврын мэдээллийг агуулсан интерферограм болно. Харилцан

хамааралгүй эхний хоёр гишүүнийг орхиход Фурье хувиргалтын явцад фазын мэдээлэлд нөлөөлөхгүй. Иймээс интерферограмыг дараах байдлаар илэрхийлж болно:

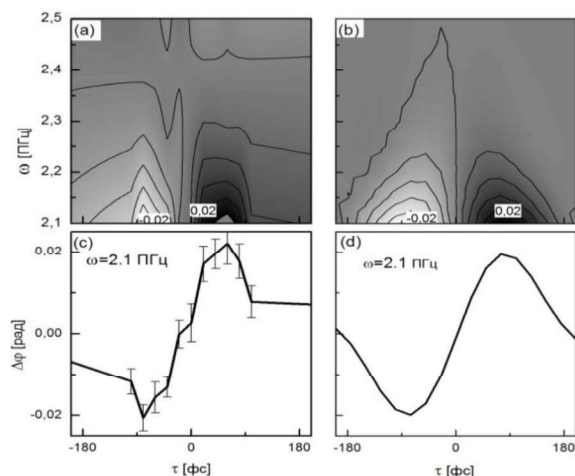
$$S(\omega) = 2\text{Re}[E_r^*(\omega)E_{pr}(\omega)] = 2\text{Re}[E_{r0}^*(\omega)E_{pr0}(\omega)\exp(i\Delta\Phi(\omega))]. \quad (3)$$

Энд, $E_r(\omega)$ ба $E_{pr}(\omega)$ нь харгалзан жишиг ба судлагч пульсын комплекс цахилгаан орон. $E_{r0}(\omega)$ ба $E_{pr0}(\omega)$ нь харгалзан жишиг ба судлагч пульсын цахилгаан орны хүчлэгийн далайц. $\Delta\Phi(\omega)$ жишиг ба судлагч пульсын фазын ялгавар, энэ өгүүлэлт спектрал фазын өөрчлөлт (СФӨ) гэж нэрлэгдсэн. Урвуу Фурье хувиргалтаар:

$$F^{-1}[S(\omega)] = f(t - \tau) + f(-t - \tau). \quad (4)$$

Энд, $f(t - \tau)$ ба $f(-t - \tau)$ нь хугацааны тэнхлэг дээр тэгш хэмтэй байрлах ижил функцууд учир ижил мэдээлэл агуулна. Иймээс тэдгээрийн зөвхөн нэг гишүүн ($f(t - \tau)$)-ийг тэгш өнцөгт функц (Heaviside function) $\Theta(t)$ -ээр томьёо (4)-ийг үржүүлснээр ялгаж авах боломжтой. Эцэст нь Фурье хувиргалт $S'(\omega) = F[\Theta(t) F^{-1}S(\omega)]$ -ийг дахин хийж СФӨ-ийг гаргаж авна.

$$\Delta\Phi(\omega) = \text{Arg}[S'(\omega)]. \quad (5)$$



Зураг 5. (a) ZnSe дээжээр нэвтэрсэн судлагч пульсын спектрал фазын өөрчлөлт (СФӨ)-ийг судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацаа (τ)-аас хамааруулж олсон үр дүн. Үр дүнг дээж дээр туссан пульсын төв давтамжтай харьцангуйгаар үзүүлэв. Энд ω судлагч пульсын давтамж. (c) СФӨ-ийн хоцрох хугацаа (τ)-ны хамаарлыг судлагч пульсын 2.1 ПГц давтамжид үзүүлэв. Хэмжилтийн үр дүнг алдааны хамт тод хар мурайгаар хоцрох хугацааны -180 фс-ээс 180 фс хүртэлх зарим утгуудад дүрслэв. (b) ба (d) Туршлагын ижил хэмжигдэхүүнүүд (a ба c-д үзүүлсэн)-ийн онолын тооцооны үр дүн юм.

Судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацааг уясан цэг бүрт хэмжигдсэн интерферограмаас СФӨ ($\Delta\Phi_i(\omega)$)-г гаргаж авсан.

V. ҮР ДҮН

Зураг 5-д туршилтаар болон онолын симуляциар гарган авсан СФӨ-ийн үр дүнг харьцуулан үзүүлэв. Судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацаа (τ)-аас хамаарсан СФӨ-ийг жишиг ба судлагч пульсын үүсгэсэн интерферометрээс гарган авсан. Хэмжилт бүрийн хувьд судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацааг уясан байсныг бид өмнө дурьдсан. Эхний хэмжилтэнд ($\tau = -340$ fs), өдөөгч пульсын дээжээр дамжиж судлагч пульст үзүүлэх нөлөөг орхиж болно гэж үзсэн. Учир нь манай пульсын өргөн (~ 10 fs) хоцрох хугацаа ($\tau = -340$ fs)-наас олон дахин бага. Эхний хэмжилтийн СФӨ-ийг $\Delta\Phi_1(\omega)$ гэж тэмдэглэв. Дараагийн хэмжилтүүдэд өдөөгч пульс судлагч пульст ойрхон ирэх учир СФӨ-д өдөөгч пульсын үүсгэсэн нөлөө орж ирнэ. Хоцрох хугацааны уясан утга бүрд харгалзах хэмжилтийн үр дүнг ($\Delta\Phi_i(\omega)$) гэж тэмдэглэв. Зөвхөн өдөөх пульсаар үүсгэгдсэн СФӨ-ийг гаргаж авахын тулд хэмжилтүүдээс олсон бүх СФӨ-өөс эхний хэмжилтийн үр дүнг хасч ($\Delta\Phi_i(\omega) - \Delta\Phi_1(\omega)$) тооцов. Энд индекс i хоцрох хугацааны мэдээллийг өгнө. Хэмжилтээр олсон СФӨ-ийг Зураг 5(a) үзүүлэв. Графикаас харахад судлагч пульс өдөөгч пульсаас хоцрох хугацаа “тэг”-ийн ойролцоо ($\tau > 0$ ба $\tau < 0$) байхад СФӨ-ийн өөрчлөлт нэлээд тод ажиглагдсан (тод хар болон цагаанаар дүрслэгдсэн). Хоцрох хугацаа (τ)-аас хамаарсан СФӨ-ийг пульсын $\omega = 2.1$ PHz давтамжид дүрсэлснийг Зураг 5(c)-д үзүүлэв. Хэмжилт хоцрох хугацаа (τ) -340 fs-с 340 fs хүртэл өөрчилж, уясан цэг бүрт хэмжилт тус бүрийг 10 удаа давтаж хийсэн. 10 хэмжилтийг ашиглан дундаж утгыг болон хэмжилтийн алдааг (~ 0.004 рад) тодорхойлсон. Дээж (ZnSe) болгон ашигласан материал манай пульс лазерийн долгионы мужид тунгалаг шинжтэй билээ. Гэвч өдөөн-судлах аргаар хэмжихэд нэвтрэлтийн коэффициент тодорхой хэмжээгээр өөрчлөгдөж байгааг Зураг 2-г үзүүлсэн. Дээжийн хаалттай бүсийн өргөн (band gap) туссан гэрлийн төв давтамжаас ойролцоогоор 2 дахин их байгаагаас харахад энд хос фотоны шингээлт (ХФШ) (two photon absorption) байж болохыг харуулж байна. ХФШ нь оптикийн гуравдугаар эрэмбийн шугаман бус процесс юм. Гуравдугаар эрэмбийн шугаман бус диэлектрик мэдрэх чадвар ($\chi^{(3)}(\omega)$)-ыг тэнцвэрт биш (non-equilibrium) Гриний функцийн тоон аргаар тооцоолж болдог [10, 11]. Энэ арга нь дээжийг бүрдүүлэгч молекулууд харилцан үйлчлэлгүй эсвэл ганц молекулын үед хэрэглэгддэг. Молекулууд харилцан үйлчлэлтэй байх

тохиолдолд Гриний функцийн аргыг өргөтгөж, тооцооллыг гүйцэтгэлээ. СФӨ-ийг тооцоолсон симуляцийн үр дүнг Зураг 5(b) ба (d)-д үзүүлэв. Симуляци хийхдээ өдөөгч ба судлагч пульсын цахилгаан орныг Гауссын түгэлтээр ойролцоолсон:

$E(\omega) = e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{\sigma^2}} e^{-i\varphi(\omega)}$. Энд, $\sigma = 0.3$ PHz - пульсын өргөнийг илэрхийлэгч параметр, $\omega_0 = 2.4$ PHz - дээж дээр тусах пульсын төв давтамж. Туссан гэрлийн анхны фаз, дээжийн хувьд суурьшлын хурд (population rate), ба дифазын хурд (dephasing rate) харгалзан $\varphi(\omega) = 0$, $\gamma = 10^{-6}$ PHz, ба $\Gamma = 100$ PHz. Дээжийн хаалттай бүсийн хагас өргөн 2.0 PHz гэж сонгож авсан. Дээжийг гурван түвшинт систем байхаар загварчилж авсан. Үүний хоёр нь бодит (доод ба дээд) төлөв, нэг нь хийсвэр (завсрын) төлөв. Эхний фотонор үндсэн төлөв($|g\rangle$)-өөс үл орших хийсвэр төлөв ($|e\rangle$)-т шилжилт хийнэ. Хэрэв хоёр дахь фотон завсрын хийсвэр төлвийн электроны амьдрах хугацааны дотор ирвэл дараалсан шингээлт явагдаж дээд түвшинд шилжилт хийгдэнэ. Үгүй бол электрон завсрын хийсвэр төлвөөс буцаж үндсэн төлөвтөө шилжинэ. Энэ үед шингээлт явагдахгүй. Хос фотоны шингээлтийн явц нь завсрын хийсвэр төлөвт электрон амьдрах хугацааны туршид тусах фотоны урсгалын хангалтаас хамаарна. Учир нь электроны завсрын төлвийн амьдрах хугацаа маш бага байдаг. Иймд фотоны урсгал их байх шаардлагатай [12].

VI. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Энэ ажлын зорилго нь өдөөн-судлах туршлагын геометрийг ашиглан дээж (ZnSe) –д өдөөгч пульсийн үүсгэсэн СФӨ-ийг судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацааны хамаарлыг судлах юм. Туссан пульсууд ба дээжийн харилцан үйлчлэлийг гуравдугаар эрэмбийн нарийвчлалаар авч үзсэн. Туссан пульсын төв давтамж (2.4 PHz) -тай харьцангуй СФӨ-г гарган авахдаа Фурье хувиргалтын спектрал интерферометрийн аргыг ашигласан. Бага давтамжийн мужид, СФӨ нь судлагч пульсын өдөөгч пульсаас хоцрох хугацаанаас хамаарч байна (Зураг 5(a)). Өдөөгч, судлагч пульсууд ба дээжийн харилцан үйлчлэлийг хос фотон шингээх үзэгдэл гэж үзэн тоон тооцоо хийж хоцрох хугацаа (τ)-аас хамаарсан СФӨ-ийг Зураг 5(d)-д үзүүлэв. Тоон симуляци ба туршилтын үр дүн сайн тохирч байсан. Туршлагын үр дүн өдөөгч ба судлагч пульсууд дээж дээр хугацааны хувьд ойрхон тусахад дээж

тунгалаг шинж чанараа алдаж байгааг илэрхийлж байна.

VII. ДҮГНЭЛТ

Лазер пульсын спектрал фазын өөрчлөлт (СФӨ)-ийг хэмжихээр интерферометрийн аргыг өдөөн-судлах (pump-probe) аргатай нэгтгэн боловсрууллаа. Энэ аргаар туссан гэрлийн спектрийн мужид тунгалаг материал (ZnSe) –ыг хүчтэй лазер пульс (өдөөгч пульс)-аар бөмбөгдөхөд дээжид үүсэх өөрчлөлтийг хэмжихээр мөн лазер пульс (судлагч пульс) нэвтрүүлж, нэвтэрсэн пульсын СФӨ-ийг хэмжих замаар пульс-материалын харилцан үйлчлэлийн динамикийг судалсан. СФӨ-ийг гаргаж авахдаа Фурье хувиргалтын аргыг хэрэглэсэн. Туршлагаар пульсын спектрал фазын маш тод өөрчлөлтийг ажигласан. Туршлагын үр дүнг хос фотоны шингээлтийн тохиолдолд СФӨ-ийг тооцоолсон онолын симуляцитай харьцуулж сайн тохирч байгаа үзүүлсэн.

ТАЛАРХАЛ

Энэхүү ажлыг гүйцэтгэхэд дэмжлэг үзүүлж суурь судалгааны SST_014/2016 төслийг санхүүжүүлсэн БСШУСЯ болон ШУТС-д гүн талархал илэрхийлье.

НОМЗҮЙ

- [1] Eiji Tokunaga and Akira Terasaki, “Femtosecond phase spectroscopy by use of frequency-domain interference”, J. Opt. Soc. Am. B 12, 753-771 (1995)
- [2] Takao Fuji, Takuya Yoda, Toshiaki Hattori and Hiroki Nakatsuka, “Phase Sensitive Pump-Probe Spectroscopy Using a Michelson-Type Interferometer”, Jpn. J. Appl. Phys. 39, 1738-1742 (2000)
- [3] E. Tokunaga, A. Terasaki, and T. Kobayashi, “Frequency-domain interferometer for femtosecond time-resolved phase spectroscopy”, Opt. Lett. 17, 1131-1133 (1992).
- [4] U. Schnell, E. Zimmermann, R. Dändliker, Pure Appl. Opt. 4 (1995) 643.
- [5] J.C. Diels, W. Rudolph: Ultrashort Laser Pulse Phenomena (Academic Press, San Diego 1996) pp. 43–45

- [6] Scott Diddams and Jean-Claude Diels, "Dispersion measurements with white-light interferometry", J. Opt. Soc. Am. B 13 (1996)
- [7] B. Tsermaa, "Generation and characterization of sub-10 fs optical pulses" PhD thesis, Chonbuk National University (2007)
- [8] L. Lepetit, G. Ch'eriaux, and M. Joffre, "Linear techniques of phase measurement by femtosecond spectral interferometry for applications in spectroscopy", J. Opt. Soc. Am. B 12, 2467-2474 (1995).
- [9] Ts. Khos-Ochir, P. Munkhbaatar, and Kim Myung-Whun, "Phase change measurement of birefringent optical devices with white light interferometry", App. Opt. 53, 141-146 (2014)
- [10] Christoph A. Marx, Upendra Harbola, and Shaul Mukamel, "Nonlinear optical spectroscopy of single, few, and many molecules; Nonequilibrium Green's function QED approach", Phys. Rev. A. 77, 022110 (2008)
- [11] Shaul Mukamel, "Partially-time-ordered Schwinger-Keldysh loop expansion of coherent nonlinear optical susceptibilities", Phys. Rev. A. 77, 023801 (2008)
- [12] Mansoor Sheik-Bahae, and Michael P. Hasselbeck, "THIRD ORDER OPTICAL NONLINEARITIES" Preprint of OSA Handbook of Optics, Vol. IV, Chapter. 17, (2000).

Оюутны сэтгэл ханамжийг Decision tree аргаар үнэлэх нь

Л.Пүрэвдолгор^{1,*}, Ц.Жавзмаа¹, Л.Ажнай, Т.Ахыт¹, Ч.Галбадрах¹, С.Оюунцэцэг², Д.Энхболд²

¹Анагаахын Шинжлэх Ухааны Үндэсний Их Сургууль, Ерөнхий эрдмийн тэнхим

²Анагаахын Шинжлэх Ухааны Үндэсний Их Сургууль, Сургалтын Бодлого Зохицуулалтын Газар

The purpose of this survey is to ask the student how they were satisfied with their studies, teaching knowledge and skills, university services, facilities and environment. In the frame of the survey there were participated totally 278 medical students (*the first, second and third year*) who had the medical physics course. The student satisfaction survey had five scale responds: “very good”, “good”, “fair”, “poor”, and “very poor”. The 32 attributed surveys database was developed in MSSQL 2008. The database has the classification model thus we used the Decision tree method. We evaluated the student satisfaction on R program by 70% and 30% the study process and trial, respectively. It was ~70% and above and it showed great significance. The student satisfaction questions were classified in three groups and the average scale was 32% of ‘very good’ and ‘good’, ‘fair’ – 52%, and ‘poor’–16%.

I. УДИРТГАЛ

Их, дээд сургуулийн үйлчилгээний чанарын шалгуур үзүүлэлтийн нэг бол оюутны сэтгэл ханамж юм. Иймээс оюутнууд сургуулиас явуулж буй сургалт, үйлчилгээ, багш нарын мэдлэг, ур чадвар, сургуулийн үйлчилгээ, материаллаг баазын хангамж, суралцах орчиндоо хэр зэрэг сэтгэл ханамжтай байгааг судлахаар зорилоо.

II. ОНОЛЫН ҮНДЭС

A. Өгөгдөл тандалт

Өгөгдлийн тандалт нь 1990 оны сүүлээр эрчимтэй хөгжиж эхэлсэн бөгөөд орчин үед эрүүл мэнд, санхүү, бизнесийн ухаан, эдийн засаг, биоинформатик, хүн судлал, сансар судлал зэрэг олон шинжлэх ухааны салбарт өргөн ашиглаж байна.

Өгөгдлийн тандалт нь их хэмжээний өгөгдөл дотроос далд зүй тогтол, утгын уялдаа холбоог нээн илрүүлэх процесс бөгөөд өгөгдлийн сангийн систем, математик, статистик болон загварчилах аргуудаар мэдлэг олж авах аргачлал юм. Энгийнээр өгөгдлийн тандалт нь өгөгдлийн сангаас хамгийн хэрэгцээтэй мэдлэг нээх арга юм.

Өгөгдлийн тандалтад цугларсан их хэмжээний өгөгдлүүдийн хоорондын ерөнхий шинжийг тодорхойлох, өгөгдлүүдийн холбоо, хамааралд дүн шинжилгээ хийх, өгөгдлүүдийг нийтлэг шинжүүдээр нь бүлэглэх, тодорхой үзүүлэлтүүдээр урьдчилан таамаглах, хэт ялгаатай өгөгдлүүдийг ялгах гэх мэт тооцоолол

хийхийн тулд ангилалт (Classification) болон бүлэглэлтийн (Clustering) аргуудыг ашигладаг. Ангилал нь нөхцөл бүрээр ангилан тодорхойлно. Нөхцөл бүр нь атрибутуудын олонлогоос бүрдэх бөгөөд эдгээрийн нэг нь класс атрибут байдаг. Энэ арга нь оролтын атрибутуудын функцээр класс атрибутаас хамаарсан загвар гарган авахыг шаардах бөгөөд шийдвэрийн мод, нейрон сүлжээ, байесийн зэрэг ангиллын алгоритмууд байна.

B. Шийдвэрийн мод

Шийдвэрийн мод нь зангилаа бүр шинж чанар, салаа туршилтын үр дүн, навч класс хаягийг (class label) тодорхойлох шаталсан хэлбэртэй мод бүтэц юм. Судалгаандаа шийдвэрийн модны ID3 алгоритмыг ашиглав. ID3 (Iterative Dichotomiser 3) нь класс хаягтай сургалтын багцыг шинжлэн дээрээс доош урсгалтай, өөрөө өөрийгөө дуудан жижиг дэд хэсгүүдэд хуваах шийдвэрийн модны алгоритм юм. Алгоритмын оролтод класс хаягаас хамааралтай D сургалтын багц, сургалтын багцыг дүрслэх шинж чанарын жагсаалт (attribute list), класс хаягийн дагуу сургалтын багцыг хамгийн сайнаар ялган ангилах шинж чанар сонгох арга (Attribute selection method) гэсэн параметрууд байна [1, 2]. Класс ангилал бүхий D сургалтын багцын атрибут бүрийн зэрэглэлийг тогтоохыг шинж чанар (Attribute Selection Measures) сонгох хэмжүүрээр тогтооно. Хамгийн өндөр оноотой атрибут салгах хэмжүүрээр тодорхойлогдоно. D сургалтын багц m ялгаатай классыг тодорхойлно C_i (*for* $i = 1, \dots, m$). Энд C_{iD} нь D багц дахь C_i классыг илэрхийлнэ [3, 4].

* Electronic address: purevdolgor@mnums.edu.mn