

Органик полимер нарны элементийн А.Ү.К-ийг сайжруулах боломжийн судалгаа

Ц.Нямаа¹, Т.Болорцэцэг¹, Н.Төвжаргал^{1,*}, Алата², Алтанбулаг², Ж.Даваасамбуу¹

¹Монгол Улсын Их Сургууль, Шинжлэх ухааны сургуулийн

Физикийн тэнхим, Улаанбаатар хот 210646, Монгол улс

²Физик, электроник, мэдээллийн технологийн сургууль,

Өвөр монголын багийн их сургууль, Хөт хот, БНХАУ

Бид энэ ажлаар РЗНТ/PCBM (poly(3-hexylthiophene)/1-(3-methoxycarbonyl) propyl-1-phenyl-[6, 6]-methanofullerene) холимог полимер материалд суурилсан органик нарны элементийн ашигт үйлийн коэффициент (А.Ү.К) -ийг сайжруулах судалгааг түүний идэвхт давхарга РЗНТ/PCBM -ийг тогтоож хатаах горимоос хамааруулан судлав. Эндээс идэвхт давхаргын гэрлийн шингээлт, гадаргуун морфологи, кристалжилт нь идэвхт давхарга тогтоох хугацаа болон дулааны боловсруулалтын горимоос хамааран хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг үзүүлэв. Хамгийн сайн үр дүн үзүүлсэн дээжүүдээ ашиглан нарны элемент хийж түүний А.Ү.К-ийг хэмжив. Идэвхт гадаргууг богино хугацаанд суулгаж хатаагаад, дараа нь шаталсан горимоор халааж боловсруулсан идэвхт давхарга бүхий нарны элементийн үр ашиг нэмэгдэж байгааг үзүүлэв.

PACS numbers: 81.05.Fb, 78.66.Qn, 88.40.hj, 88.40.jr

I. Удиртгал

Энергийн шинэ үүсгүүр, түүнийг хувиргах, хадгалах нь дэлхий нийтийн өмнө тулгамдсан нэгэн томоохон асуудал болж байгааг холбоотойгоор сүүлийн жилүүдэд эрчим хүчний системд ашиглагддаг материалын судалгаа эрчимтэй хийгдэж байна. Бидний өнөөгийн амьдралыг цахилгаан эрчим хүчгүйгээр төсөөлшгүй билээ. Одоогийн байдлаар нүүрс, байгалийн хий, газрын тос зэрэг үл нөхөн сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсгүүрүүдийг түлхүү ашиглаж байгаа ч ойрын ирээдүйд эдгээрийг байгаль орчинд ээлтэй үүсгүүрээр солих шаардлага тулгарч байна. Учир нь эдгээр эрчим хүчний эх үүсгүүрүүд нь шавхагдахаас гадна хүлэмжийн хий, утаа, орчны бохирдол зэрэг асуудлууд үүсгэж байна. Иймээс нөхөн сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүрт ашиглагддаг материалыг сайжруулах судалгааг хийх шаардлагатай болж байна [1]. Ялангуяа нарны эрчим хүчийг үр дүнтэй ашиглах, өндөр А.Ү.К бүхий нарны элемент гарган авах судалгааны ажил түлхүү хийгдэж байна. Мөн сүүлийн жилүүдэд органик полимер хагас дамжуулагч материалд суурилсан уян нарны элементийг гарган авах, түүнийг сайжруулах боломжийн судалгаа судлаачдын сонирхлыг ихээхэн татаж байгаа сэдэв юм. Манай орны хувьд өргөн уудам нутаг дэвсгэрт нүүдэлчин ахуйгаа дагаад тархан суурьшсан бүх айл өрхийг төвийн цахилгаан эрчим хүчний нэгдсэн системд холбох боломжгүй. Хэдий ийм боловч нарны цахилгаан эрчим хүчний үүсгүүрийг ашиглах замаар асуудлыг шийдэж

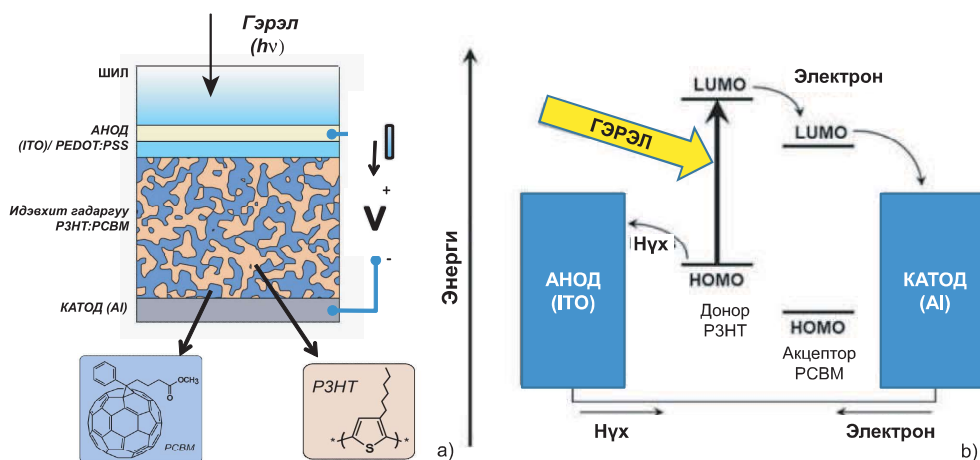
байна. Гэвч сүүлийн жилүүдэд малчин иргэдийн хэрэглэх цахилгаан хэрэгслийн тоо нэмэгдэж эрчим хүчний хэрэглээ өсөх хандлага байгааг холбоотойгоор илүү том талбайтай нарны самбар ашиглах хэрэгцээ гарч байна. Энэ нь овор хэмжээ их, хэрэглээний горимоосоо шалтгаалан төдийлөн сайн шийдэл биш юм. Хэрэв хямд төсвөөр уян хатан, бат бөх, өндөр үр ашигтай нарны элемент хийж чадвал өдөр тутмын энгийн хэрэглээ (хувцас, цүнх, тээврийн хэрэгсэл, гэр орон г.м) болон нүүдэлчин ахуйд зохицсон тохиромжтой хэлбэрээр ашиглах боломжтой. Одоогоор олон төрлийн уян хатан органик нарны элемент гарган авч байгаа боловч түүний А.Ү.К бага байгаа учраас төдийлөн хэрэглээнд бүрэн гүйцэд нэвтрэхгүй байна. Сүүлийн жилүүдэд органик полимер хагас дамжуулагч материалд суурилсан нарны элементүүдийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх судалгаа эрчимтэй хийж байгаа бөгөөд цаашлаад практик хэрэглээнд ашиглаж болох хүртэл сайжруулсаар байна. Ингэхдээ органик нарны зайн идэвхт гадаргуу болгон ашиглах материалын өөрчлөх замаар үр ашгийг сайжруулах нь илүү үр дүнтэй байдаг [2, 3]. РЗНТ/PCBM холимог хагас дамжуулагч полимер нь органик нарны зайн идэвхт гадаргуу болгон ашигладаг онцгой материал юм. Энд PCBM (1-(3-methoxycarbonyl) propyl-1-phenyl-[6, 6]-methanofullerene) нь 1990 онд синтезлэн гаргаж авсан [4], хориотой бүсийн өргөн 3.9 эВ электроны акцептор хагас дамжуулагч материал бөгөөд органик нарны элемент, уян электрон төхөөрөмжүүдэд РЗНТ болон бусад донор полимер материалуудтай хослуулан ашиглаж байна. РЗНТ (poly(3-hexylthiophene)) нь холимог полимер хагас дамжуулагч нь цэнэг зөөгчийн хөдлөх чадвар сайн болон хориотой бүсийн өргөн 1.9-2 эВ байдаг нь нарны элементээр ашиглах

*E-mail: tuvjangal@num.edu.mn

хагас дамжуулагчийн шинж чанарыг үзүүлж байгаа юм [6]. Органик нарны элементийн идэвхт давхарга хийхэд РЗНТ-ийг донор, РСВМ-ийг акцептор болгон ашигласан нарны зайн цахилгаан орчныг өөрчлөх, РЗНТ/РСВМ-ийн хольцын концентрацийн харьцааг өөрчлөх болон дулаан боловсруулалт хийсний дүнд одоогоор А.Ү.К-ийг 3.5%-д хүргээд байна[7].

Олон төрлийн хийц хэлбэр бүхий органик нарны элементүүд байдаг. Үүнд: дан болон олон давхарга бүтэцтэй нарны элементүүд багтдаг [10]. Бидний хийх нарны элемент бол донор акцептор холимог давхаргаас тогтох олон үет

(multilayer) бүтэцтэй нарны элемент юм. Зураг.1-т хөнгөн цагаан (Al) анод, хоорондоо фазын ялгаа бүхий донор акцептор (РЗНТ буюу p- төрлийн донор хагас дамжуулагч, РСВМ буюу n- төрлийн акцептор хагас дамжуулагч) идэвхт давхаргатай, нүхэн дамжуулалтыг дэмжих PEDOT:PSS (poly(3,4 ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) полимер давхаргатай, ITO (Indium tin-oxide) бүхий тунгалаг шилэн катодтай органик полимер нарны зайн бүтэц болон тэнд гэрлийн шингээлтээр донор, акцептор фазуудын дагуу электрон болон нүх шилжих энергийн төвшний диаграммыг үзүүлэв.



Зураг 1: Олон давхарга бүхий органик полимер нарны зай: а) Бүтцийн диаграмм, энд гэрлийн шингээлтээр донор, акцептор фазуудын дагуу электрон болон нүх шилжинэ. б) Энергийн төвшний диаграмм.

Бид энэхүү ажлаар органик нарны элементийн идэвхт давхарга хийх материал РЗНТ/РСВМ-ийн гэрлийн шингээлт, кристалжилт, гадаргуун морфологи зэрэг түүнийг тогтоох горимоос хамааруулан судлах замаар нарны зайн ашигт үйлийн коэффициентийг сайжруулах боломжийг судалж, олон давхаргатай полимер нарны зай хийж түүний А.Ү.К хэмжих зорилготой.

II. Туршилт

РЗНТ/РСВМ холимог дээж бэлтгэх, түүний гэрлийн шингээлт, гадаргуун морфологи, кристалжилт зэргийг судлах, нарны элемент хийж А.Ү.К-ийг хэмжих туршилтын үйл ажиллагааг дараах дарааллаар гүйцэтгэнэ. Үүнд:

- РЗНТ болон РСВМ нунтаг бодисыг 1:1

жингийн харьцаатай хольж 2мл o-DCB(1, 2 Dichlorobenzene) уусгагчид хийн glove box-т 120°C температурт 3 цаг соронзон хутгуурт хутгаад, дараа нь орчны температурт 24 цагийн турш нэгэн төрөл болтол хутгаж РЗНТ/РСВМ холимог уусмал бэлтгэсэн.

- ITO контакт бүхий шилэн бэлдцээ цэвэрлэгч уусмалууд (Ethanol absolute (CH₃CH₂OH), Isopropyl alcohol ((CH₃)₂CHOH), Acetone (CH₃COCH₃))-д хийж хэт авианы цэвэрлэгч болон озоны орчинд хэт ягаан туяагаар шарж цэвэрлэнэ. Шилний гадаргуу дээрх бохирдлыг бүрэн цэвэрлэж байгаа нь тоосны жижиг мөхлөгөөр дамжин богино холбоо үүсэж нарны элемент эвдрэхээс сэргийлсэн.

- РЗНТ/РСВМ идэвхт давхарга тогтоох: Spin Coater ашиглан цэвэрлэсэн шилэн дээрээ өмнө

бэлтгэсэн РЗНТ/PCBM уусмалаа жигд тарааж идэвхт давхарга тогтооно. Ингэхдээ дараах горимуудаар суулгасан болно. Үүнд:

1. Spin coater-т 600 эрг/мин эргэлтийн хурдтайгаар 30секунд, 60секунд, 90секунд эргүүлж азотын орчинд glove box-т 24 цаг хатаав.
2. Энэ гурван дээжээс хамгийн сайн шинж чанар үзүүлсэн горимыг сонгож дахин хоёр дээж бэлтгэв.
3. Дахиж идэвхт давхарга тогтоож хатаасан хоёр дээжээ дараах горимоор дулааны боловсруулалтад оруулав:
 - Нэгийг нь шууд 150°C температурт 20 минут халаагаад зугуухан хөргөв.
 - Нөгөөг нь шаталсан горимоор буюу 70°C –т 20 минут → 110°C –т 20 минут → 150°C –т 20 минут халаагаад аажуухан хөргөв.
4. Ингээд ердийн нөхцөлд хатаасан, шууд болон шатлалтай горимоор халааж хатаасан гурван өөр дээж бэлэн болно.

- Ердийн нөхцөлд хатаасан, шууд болон шатлалтай горимоор халааж хатаасан дээжүүдийн гэрлийн шингээлтийг хэт улаан туяа-үзэгдэх гэрлийн спектрометр (UV/VIS spectrometer Lambda 35) –ээр, талстжилтыг рентген дифракцийн аргаар (XRD), гадаргуун морфологийг атомын хүчний микроскоп (AFM) ашиглан судлав.

- Нарны элемент хийх: Идэвхт давхаргын шинж чанарыг судалсны үндсэн дээр хамгийн сайн үр дүн үзүүлсэн дээжүүдээр нарны элемент хийсэн. Дээр дурдсан ИТО-тэй шил цэвэрлэх аргаар 3 ширхэг шилийг цэвэрлэж бэлтгэсэн. Spin coater-т 2000 эрг/мин хурдтай 30секунд хугацаанд PEDOT:PSS-ийн үе давхарга тогтоосны дараа шил тус бүрийг 120°C-д 20 минут хатааж тогтоосон үеийг бэхжүүлэв. Дараа нь шил тус бүрийг дахин spin coater-д хийж 54000-75000 молекулын жинтэй РЗНТ/PCBM уусмалаа дусааж 600 эрг/мин хурдтай 30 секунд эргүүлж идэвхт гадаргууг тогтоосон бэлдэц бэлэн болно.

- Эндээс 2 бэлдцийг сонгон авч нэгийг нь 70°C –т 20 минут → 110°C –т 20 минут → 150°C –т 20 минут шаталсан горимоор, нөгөөг нь 150°C –ийн температурт шууд халааж дулааны боловсруулалт хийж бэлтгэнэ.

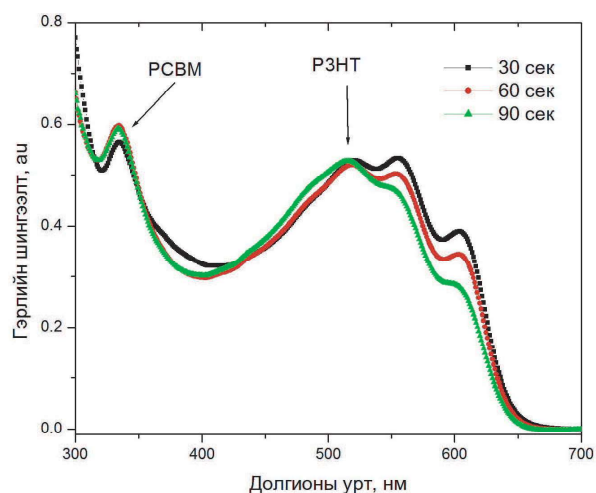
- Идэвхт давхарга суулгаж бэлтгэсэн бэлдэц тус бүрийг 10^{-4} Па вакуум орчинд ууршуулах аргаар хөнгөн цагаан анодын давхарга суулгаж өгнө. Нарны элемент хийх бүх бэлтгэл болон

боловсруулалт нь азотын орчин бүхий glove box- д хийгдсэн. Ингээд 3 өөр горимоор идэвхт давхарга тогтоож хийсэн гурван ширхэг нарны зай бэлэн болов.

- Нарны зай тус бүрийг нарны гэрлийн эрчимтэй тэнцүү эрчим бүхий гэрэл гаргагч XENON Lamp controller (AM 1.5G Conditions) багаж ашиглан тэдгээрийн А.Ү.К-ыг тодорхойлсон.

III. Үр дүн

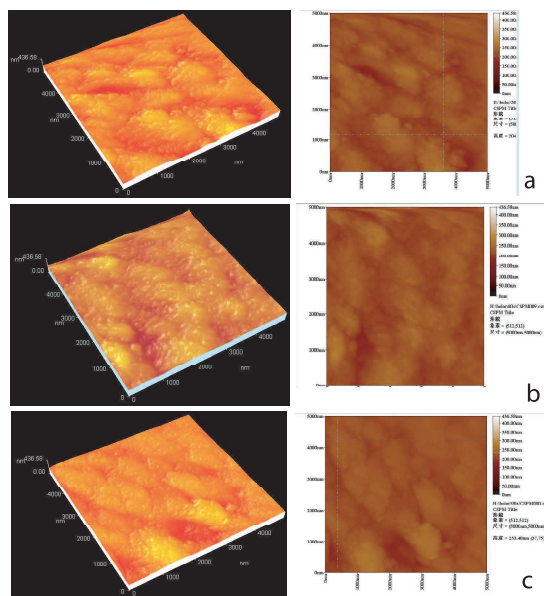
Бид олон үе давхарга бүхий органик нарны элементийн идэвхт давхарга болох РЗНТ/PCBM -ийг ИТО бүхий шилэн гадаргуу дээр тогтоож дээжийн гэрлийн шингээлт, гадаргуун морфологи, талстжилт зэргийг судалсан. Эхлээд РЗНТ/PCBM идэвхт давхарга тогтоох хугацааг 30 секунд, 60 секунд, 90 секунд байхаар аваад ердийн орчинд хатаасан дээжүүдийн хувьд гэрлийн шингээлтийн хэмжилтийн үр дүнг зураг.2 үзүүлэв.



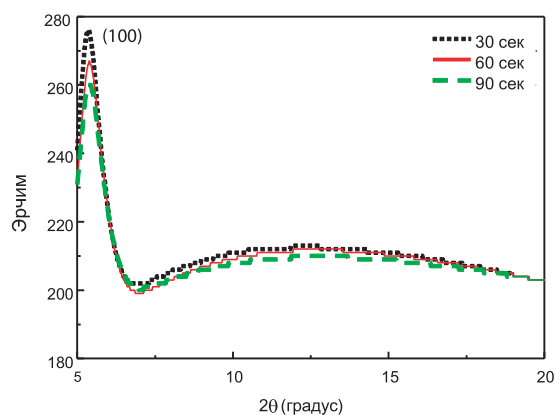
Зураг 2: Ердийн горимоор хатаасан РЗНТ/PCBM нэгдлийн үзэгдэх гэрлийн муж дэх гэрлийн шингээлтийн спектр

Эндээс үзэхэд 30 секундын хугацаанд идэвхт давхарга тогтоож бэлтгэсэн дээжүүдийн үзэгдэх гэрлийн мужид илүү сайн гэрлийн шингээлт үзүүлсэн байна. РЗНТ фазын хувьд 400-650 нм үзэгдэх гэрлийн мужид гэрэл шингээлт өгдөг бол PCBM фазын хувьд 300-350 нм хэт ягаан туяаны мужид гэрэл шингээлт өгдөг. Энэ нь эдгээр материалуудын электрон бүтэцтэй холбоотой. Мөн эдгээр дээжүүдийн гадаргуугийн морфологийг атомын хүчний микроскоп ашиглан дүрсэлснийг зураг.3-т үзүүлэв.

Идэвхт гадаргуун морфологи нь самны шүд шиг арзгар, фаз хоорондын үе ялгарсан барзгар гадаргуутай байвал сайн. Учир нь донор болон



Зураг 3: Идэвхт гадаргуу P3HT/PCBM -ийн гадаргуун морфологи: а) 30 секунд тогтоосон, б) 60 секунд тогтоосон, в) 90 секунд тогтоосон дээсүүд



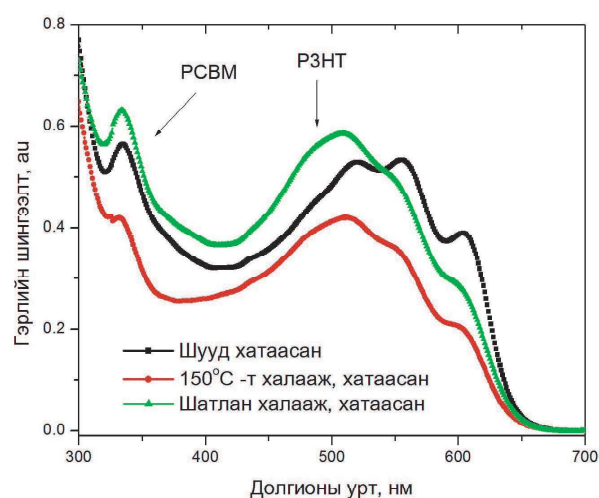
Зураг 4: Ердийн горимоор хатаасан P3HT/PCBM нэгдлийн рентген спектр.

акцептор фазын дагуу электрон болон нүхний шилжилт явагдах тул фазуудын түгэлт нь жигд тархалттай байх хэрэгтэй. Эндээс үзэхэд идэвхт давхаргыг 30 секунд тогтоосон дээжийн гадаргуу арзгар бөгөөд фазууд нэгэн төрөл хэмжээтэй тархан суусан болох нь харагдаж байна. Идэвхт гадаргуу тогтоох хугацаа нэмэгдэх тутам гадаргуу нь гөлгөр, фаз нь ялгагдахгүй жигд болж байгаа нь харагдаж байна.

Зураг.4-т дээжүүдийн талстжилтын рентген дифракцын аргаар хэмжсэн үр дүнг үзүүлэв. Полимер материал боловсруулалтын горимоос хамааран тодорхой хувийн талст болон аморф фазаас тогтдог. Фазын харьцааг тухайн материалын талстжилтийн зэргээр илэрхийлдэг.

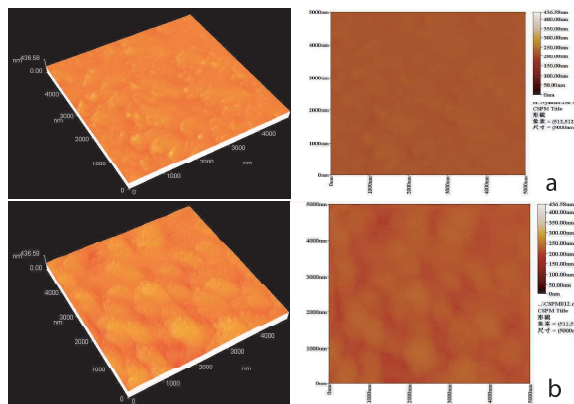
Талст фазын рентген дифракцын спектр нь хурц эрчим өндөртэй пик өгдөг бол аморф фазын рентген спектр сул, эрчим муутай байна. P3HT:PCBM холимог полимер нэгдэл дэх PCBM-ийн хувьд $2\theta = 22^\circ$ орчим өргөн, эрчим султай пик бүхий рентген спектр өгдөг аморф шинж чанар бүхий материал бол P3HT-ийн хувьд $2\theta = 5.37^\circ$ орчим кристаллаграфын $\langle 100 \rangle$ чиглэлд хурц, өндөр эрчим бүхий пик бүхий рентген спектр өгдөг материал юм. Энэ нийлмэл материалд P3HT нь талстжсан сүлжсэн морфологи бүхий эффект үзүүлэн тогтдог бол түүний завсараар PCBM аморф фаз холбоос болон суусан бүтэцтэй байдаг[11]. Хатуу полимер материал ихэвчлэн тунгалаг биш байдаг бол талстжилтийн зэрэг нь нэмэгдэх тусам тунгалаг чанар нь сайжирна. Зураг.4- ээс үзэхэд идэвхт гадаргууг 30 секунд тогтоож хатаасан дээжийн талст фазад харгалзах пик ($2\theta = 5.37^\circ$) бусдаасаа илүү эрчим өндөртэй байгаа нь илүү талстжисан болохыг харуулж байна.

Дээрх хэмжилтийн үр дүнгүүдээс үзэхэд 30 секундний хугацаанд идэвхт гадаргуу тогтоож хатаасан дээж илүү сайн үр дүн үзүүлж байна. Иймээс бид уг дээжийг сонгон авч шууд 150°C температурт 20 минут халаагаад аажуухан хөргөх болон шаталсан горимоор буюу 70°C –т 20 минут $\rightarrow 110^\circ\text{C}$ –т 20 минут $\rightarrow 150^\circ\text{C}$ –т 20 минут халаагаад аажуухан хөргөх замаар дулааны боловсруулалтад оруулж дээжийн гэрлийн шингээлт, гадаргуун морфологи, кристалжилт зэргийг дахин хэмжиж үзсэн.



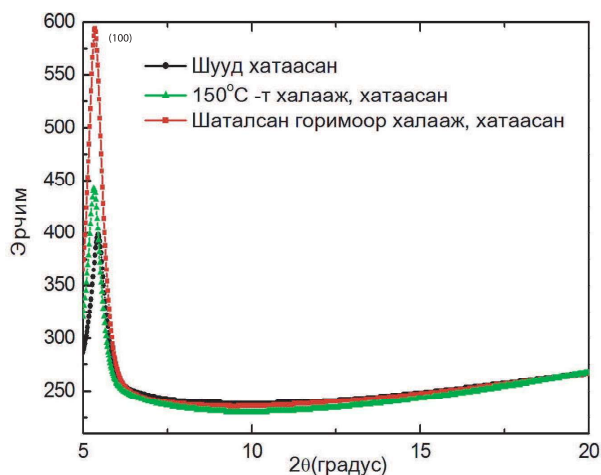
Зураг 5: Ердийн горимоор шууд хатаасан, 150°C температурт 20 минут халаагаад хатаасан, 70°C –т 20 минут $\rightarrow 110^\circ\text{C}$ –т 20 минут $\rightarrow 150^\circ\text{C}$ –т 20 минут шаталсан горимоор халаагаад, хатаасан P3HT/PCBM нэгдлийн үзэгдэх гэрлийн муж дахь гэрлийн шингээлтийн спектр.

Дулааны боловсруулалт хийсэн дээжүүдийн гэрлийн шингээлтийг хэмжсэн



Зураг 6: Идэвхт гадаргуу P3HT/PCBM -ийн гадаргуун морфологи: а) 150°C температурт 20 минут халаагаад хатаасан, б) 70°C –т 20 минут → 110°C –т 20 минут → 150°C –т 20 минут шаталсан горимоор халаагаад хатаасан дээжүүд.

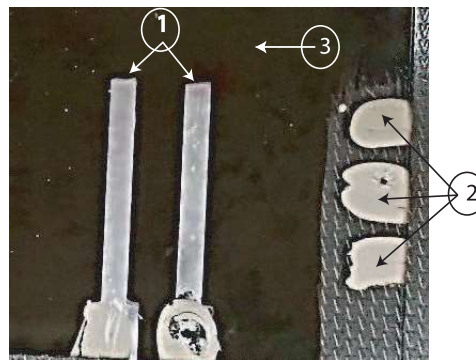
үр дүнг зураг.5 -т үзүүлэв. Эндээс үзэхэд шаталсан горимоор халааж, хатаасан дээжийн хувьд илүү сайн гэрэл шингээлт үзүүлсэн байна. Мөн гадаргуугийн морфологийн бүтцийн AFM хэмжилтийн үр дүнг зураг.6-т үзүүлэв. Шаталсан горимоор халааж хатаасан дээжийн хувьд гадаргуу нь арзгар, фазуудын хувьд нэгэн жигт тархалттай байгаа нь харагдаж байна.



Зураг 7: Дулааны боловсруулалтанд оруулсан идэвхт гадаргуу P3HT/PCBM -ийн рентген спектр.

Зураг.7-т дулааны боловсруулалт хийсэн дээжүүдийн талстжилтийг рентген дифракцын аргаар хэмжсэн үр дүнг үзүүлэв. Шаталсан горимоор халааж бэлтгэсэн дээж кристалжилт өндөртэй байгаа нь $2\theta = 5.37^\circ$ -т харгалзах талст фазын пикээс харагдаж байна.

Дээрх туршилтын үр дүнгүүд дээрээ үндэслэн P3HT/PCBM идэвхт гадаргууг 600 эрг/мин эргэлтийн хурдтайгаар 30 секунд тогтоож хатаасан болон хоёр өөр горимоор дулаан



Зураг 8: Идэвхт гадаргуу P3HT/PCBM -д суурилсан олон давхарга бүхий нарны элемент: Энд 1. катод (Al), 2. анод (ITO), 3. идэвхт гадаргуу (P3HT/PCBM).

боловсруулалт хийж бэлтгэсэн дээжүүдээ ашиглаж гурван өөр нарны элемент хийсэн загварыг зураг.8 -д үзүүлэв.

Ердийн нөхцөлд хатаасан, шууд болон шатлалтай

Үүр	Дулааны боловсруулалт		Ердийн хатаалт
№	Шууд 150°C	Шаталсан	30 секунд
1	3.2 %	3.6%	2.4%
2	3.1%	3.4%	2.55%
3			2.6%

Хүснэгт I: Нарны элементүүдийн А.Ү.К-ийн хэмжилтийн үр дүн.

горимоор халааж хатаан идэвхт давхарга тогтоосон дээжүүдээ ашиглан хийсэн гурван нарны элемент тус бүрийн А.Ү.К -ийг нэг нарны гэрэл гаргагч XENON Lamp controller (AM 1.5G Conditions) багаж ашиглан тодорхойлсон үр дүнг хүснэгт.1-т үзүүлэв.

Хүснэгтээс үзэхэд органик нарны элементийн А.Ү.К -ийг идэвхт давхарга тогтоох горимыг өөрчлөх замаар сайжруулж болох нь харагдаж байна.

IV. Дүгнэлт

Бид энэ ажлаар органик полимер материалд суурилсан нарны элементийн идэвхт давхарга P3HT/PCBM -ийн гэрлийн шингээлт, гадаргуун морфологи болон талстжилт нь давхарга тогтоох горим болон дулааны боловсруулалтаас хэрхэн хамааран өөрчлөгдөж байгааг үзүүлэв. Эндээс үзэхэд 30 секунд идэвхт гадаргуу тогтоосон дээжийн гадаргуун морфологийн хувьд фазууд нь илүү арзгар, жигт тархацтай, гэрлийн шингээлт үзэгдэх гэрлийн мужид өндөр, талстжилт нь сайн байна. Иймээс энэ дээжээ шууд болон шаталсан горимоор халааж дулааны

боловсруулалтад оруулж судлахад шаталсан горимоор халаах нь илүү үр дүнтэй болох нь туршилтын үр дүнгээс харагдаж байна. Идэвхт гадаргуун гэрлийн шингээлт, гадаргуун морфологи, талстжилт зэрэг нь ашигт үйлийн коэффициентыг сайжруулах гол үзүүлэлт болох нь хүснэгт.1-т үзүүлсэн хэмжилтийн үр дүнгээс харагдаж байна.

санхүүжүүлсэн ШУТС болон БСШУС -ийн яам, МУИС болон туршилт боловсруулалтыг хийх материал болон багаж төхөөрөмжөөр хангаж, үнэтэй зөвлөгөө өгч тусалж байсан БНХАУ-ийн ӨМӨЗО-ний Багшийн их сургуулийн Функционал материалын физик химийн лабораторийн хамт олонд гүн талархал илэрхийлье.

Талархал

Энэхүү ажлыг гүйцэтгэхэд дэмжлэг үзүүлж суурь судалгааны SST_018/2015 төслийг

-
- [1] A. Goetzberger, C. Hebling, and H.-W. Schock, *"Photovoltaic materials, history, status and outlook"* Materials Science and Engineering R 40, 1 (2003)
 - [2] Kim, H. et al., *"Organic solar cells based on conjugated polymers: history and recent advances"* Korean J. Chem. Eng. 31, 1095-1104 (2014)
 - [3] G. Yu, J.Gao et al., Science 258, (1992) 1474
 - [4] Jan C.; Knight, Brian W.; Lepeq, F.; Wudl, Fred; Yao, Jie; Wilkins, Charles L., *"Preparation and Characterization of Fulleroid and Methanofullerene Derivatives"*. The Journal of Organic Chemistry. 60 (3): 532-538
 - [5] N.S. Sariciftci, L.Smilowitz, et al., Science 270 (1995) 1789.
 - [6] Vishal Shrotriya, Jianyong Ouyang, Ricky J. Tseng, Gang Li, Yang Yang., *"Absorption spectra modification in poly(3-hexylthiophene):methanofullerene blend thin films"* Chemical Physics Letters 411 (2005), 138-143
 - [7] F.Padinger, R.S.Rittberger, N.S.Sariciftci., Adv.Funct. Mater. 13, (2003) 85
 - [8] Van Franeker, J. J., Turbiez, M., Wienk, M. M. Janssen, R. A. J., *"A real-time study of the benefits of co-solvents in polymer solar cell processing"* Nat. Commun. 6, 6229 (2015)
 - [9] C.J. Brabec, V. Dyakonov, J. Parisi, N.S. Sariciftci., Organic Photovoltaics: concepts and Realization, Springer-Ver-Lag, Heidelberg, 2003.
 - [10] Wertz JE, Bolton JR., J. Mater. Res. 19, 1924 (2004)
 - [11] Sanjay Sahare, Naresh Veldurthi, Suwarna Datar and Tejashree Bhawe., RSC Adv., 5, 102795 (2015)