

# Нарны зайн хагас дамжуулагч материалд үзүүлэх сансрын орчны нөлөөллийг тооцоолох нь

О.Сарнай, Х.Лувсанбат, Г.Анар, Т.Төртогтох, Т.Бэгзсүрэн, Ж.Маргад-Эрдэнэ, Д.Эрдэнэбаатар\*

Монгол Улсын Их Сургууль, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Байгалийн ухааны салбар, Физикийн тэнхим, Нано хиймэл дагуул хөгжүүлэлтийн лаборатори

Сансрын орчныг судлахын тулд нано-хиймэл дагуулуудыг өргөнөөр ашигладаг бөгөөд энэ нь эрчим хүчээ нарны зайгаар дамжуулж авдаг. Харин сансрын цацрагууд болон цэнэгт бөөмсийн нөлөөллийн улмаас уг нарны элементүүд элэгдэлд орж, эвдэрдэг байна. Иймд бид хиймэл дагуулын даалгаврын хугацаанд хэр зэрэг цэнэгт бөөмсийн дозонд өртөн гэмтэж, түүний ажиллах чадвар буюу гүйдэл, хүчдэл хэрхэн буурч буйг тооцоолсон үр дүнг энэхүү өгүүлэлд үзүүлэв.

Түлхүүр үг: Хагас дамжуулагч материал, монокристалл нарны зай

## I. УДИРТГАЛ

“Нано хиймэл дагуул хөгжүүлэх лаборатори”-ын хэрэгжүүлж буй “Тэмүүлэл” хиймэл дагуулын төслийн хүрээнд түүний нарны зайн ажиллах явцдаа учирч болох эвдрэлийг хөөргөхөөс нь өмнө тооцоолох шаардлага тулгарсан учир монокристалл хагас дамжуулагч буюу цахиур агуулсан нарны зайн эвдрэлийг тооцоолон олсон. Учир нь монокристалл нарны зай нь поликристалл нарны зайг бодвол харьцангуй хямд өртөгтэй тул бага зардлаар үндсэн зорилгоо биелүүлж, сансрын технологийг эх орондоо хөгжүүлэх бүрэн боломжтой болох юм. Сансрын цацрагийн нөлөөлөл ихтэй хатуу, ширүүн нөхцөлд хагас дамжуулагч материалууд өртөгдөж, цэнэглэгдэх, элэгдэх зэрэг аюул, гэмтэл учирдаг. Иймд хиймэл дагуулын бүтэц, үйл ажиллагаанд ашиглагддаг хагас дамжуулагч материалаас бүтсэн элементүүд сансрын цэнэгт бөөмсийн урсгалт өртөгдсөний дараа хэр хэмжээгээр элэгдэж, гэмтэхийг тодорхойлох нь маш чухал юм. Эндээс даалгавар биелэгдэх хугацаанд тохиолдох сансрын цацрагийн дозыг тооцоолон, түүн дээр анализ хийж монокристалл нарны зайн ажиллах чадвар буюу гүйдлийн нягт болон чадлын өөрчлөлтийг тооцоолов. Энэ нь хиймэл дагуулын цахилгаан тэжээлийн системийн нарны зайн чадварын алдагдлыг таамаглахад шаардлагатай юм.

“Тэмүүлэл” төсөлд ашиглагдаж буй нарны зайг дараах зурагт үзүүлэв.



1-р зураг. Anysolar KXOB25-05X3F загварын монокристалл нарны зай [ (Anysolar, n.d.)1]

## II. ОНОЛЫН ҮНДЭС

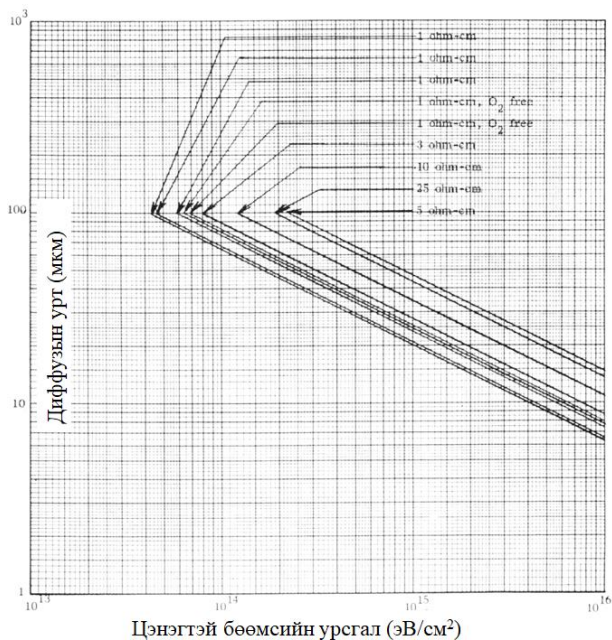
Сансрын орчны зүгээс электрон, протон зэрэг цэнэглэгдсэн бөөмс дэлхийн гадарга орчим дахь төхөөрөмжүүдтэй харилцан үйлчлэлцдэг.[2] Нарны бөөмсийн үйлчлэлд нарны зай өртөн, түүнийг бүрдүүлэгч монокристалл хагас дамжуулагч материалын атомын гадаад давхраанаас электрон сугаран гарч дараагийн давхарга руу нэвчиснээр дамжууллын гүйдэл үүсгэнэ. Үүнд n-төрлийн буюу атомын гадаад давхраандаа илүү нэг электроной хагас дамжуулагчийн электрон сугарах юм. Харин түүний доод давхаргад орших p-төрлийн буюу гадаад давхраандаа нэг электроноор дутуу хагас дамжуулагчийн нэмэлт нэг электроны байр суурийг “нүх” гэж нэрлэдэг. Үүнийг эерэг цэнэгтэй “бөөм” гэж төсөөлж болно. Сөрөг цэнэгтэй ионууд фотоны үйлчлэлээр сугаран гарч, эерэг цэнэгтэй нүхнүүд рүү диффузлэснээр электрон-нүхний хосмогуудыг үүсгэж, нэгэн чиглэлт n-p дамжууллыг бий болгоно. Гэсэн хэдий ч диффуз ханан, электрон-нүхнүүдийн хосмогийн улмаас үүссэн цахилгаан орны

\* [erdenebaatar.d@num.edu.mn](mailto:erdenebaatar.d@num.edu.mn)



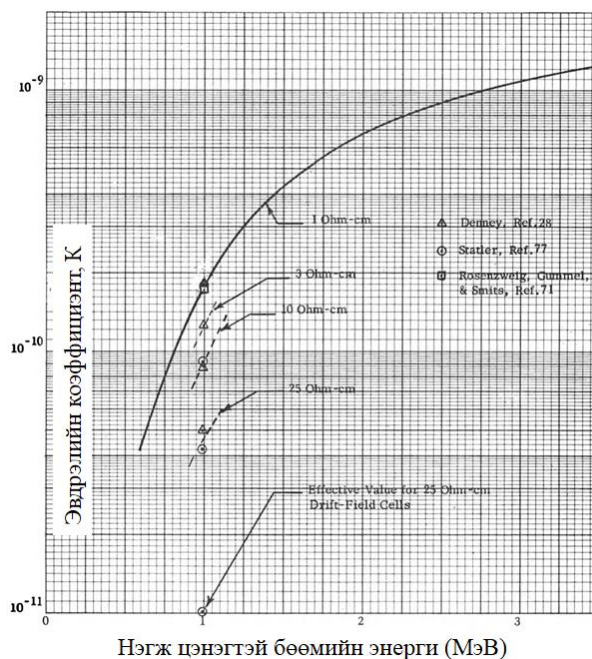
7 МэВ энергийн муж дахь тоон утгуудыг тооцоолон гаргасан. Энд нарны зай цэнэгт бөөмсийн үйлчлэлд өртөхөд түүний диффузын урт, гүйдлийн нягт, максимум чадал зэргийн утгыг тооцоолж гаргасан. Уг арга зүйн дагуу судалгааны үр дүнг тооцоолох аргыг ашиглан өөрийн тооцооллыг хийсэн. SPENVIS программаар[6] тооцоолсон электрон, протоны урсгалын утгыг ашиглан өөрчлөгдсөн диффузын урт болон эвдрэлийн коэффициентыг дараах логарифмын хуваарьтай графикуудыг ашиглан гаргасан.

3-р зурагт нарны зайн диффузын урт ажиллах хугацаандаа өртөгдөх дозын хэмжээнээс хэрхэн хамаарахыг үзүүлсэн байна. [3] Эндээс диффузын уртын бөөмийн урсгалаас хамаарах (1) (2) томъёог гаргаж авсан болно.

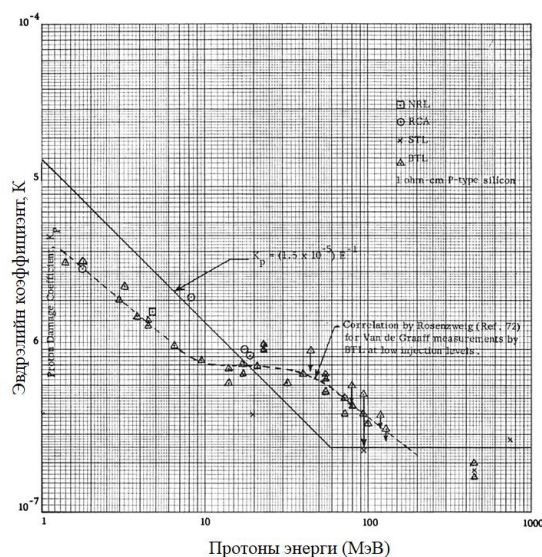


3-р зураг. n-р дамжууллын үед диффузын урт цэнэглэгдсэн бөөмсийн хэмжээнээс хамаарах хамаарал[3].

4-р зурагт нарны зайн эвдрэлийн зэрэг K нь цэнэглэгдсэн бөөмсийн хэмжээнээс хэрхэн хамаарахыг харуулсан байна. Энэ графикаас эвдрэлийн коэффициентийн цэнэгтэй бөөмийн энергиэс хамаарсан хамаарлын математик томъёог (5) гарган авсан. 5-р зурагт n-р дамжууллын үед эвдрэлийн коэффициент цэнэглэгдсэн протоны хэмжээнээс хамаарах хамаарал харагдаж байна. Энэ графикаас эвдрэлийн коэффициентийн цэнэгтэй бөөмийн энергиэс хамаарсан хамаарлын математик томъёог (6) гарган авсан.



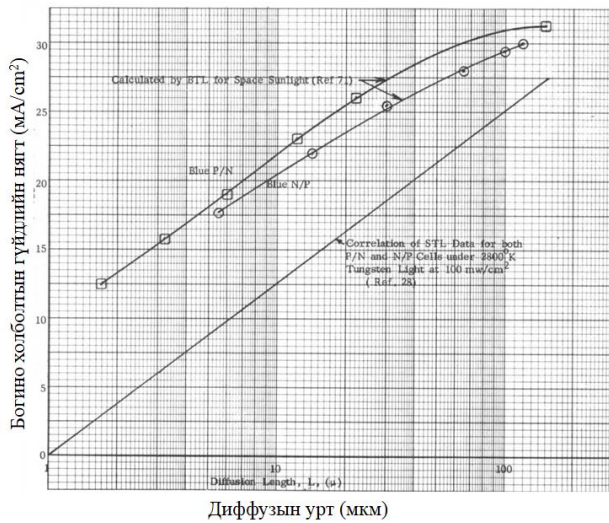
4-р зураг. n-р дамжууллын үед эвдрэлийн коэффициент цэнэглэгдсэн электроны хэмжээнээс хамаарах хамаарал. [3]



5-р зураг. n-р дамжууллын үед эвдрэлийн коэффициент цэнэглэгдсэн протоны хэмжээнээс хамаарах хамаарал[3].

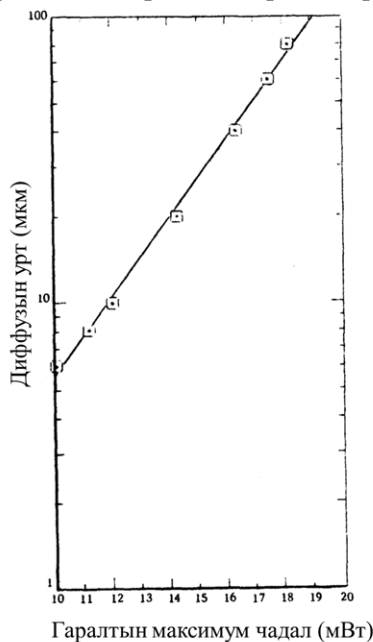
Диффузын уртыг тооцоолсноор тухайн сонгож авсан нарны зай (монокристалл)-д гүйх гүйдлийн нягтын утга болон максимум чадлын утгуудыг (3) (4) томъёонуудын тусламжтай олох боломжтой. Эдгээр томъёог дээрхийн адил судалгааны үр дүнг тооцоолох аргыг ашиглан гаргаж ирсэн.

6-р зурагт гүйдлийн нягт нарны зайн диффузын уртын логарифмаас хэрхэн хамаарахыг үзүүлэв.



6-р зураг. Гүйдлийн нягт диффузын уртын логарифмаас хамаарах хамаарал [3].

7-р зурагт нарны зайн чадал диффузын уртын логарифмаас хамаарах хамаарлыг харуулав.



7-р зураг. Чадалын хэмжээ диффузын уртын логарифмаас хамаарах хамаарал [3].

#### IV. ТООЦООЛОЛ

SPENVIS гэх веб программыг ашиглан нэгж талбайд оногдох протон болон электроны тоо хэмжээг тооцоолон гаргаж авсан авсан.

Үүний дүнд нэгж талбайд (см<sup>2</sup>) оногдох протоны 0.1-400 МэВ хүртэлх энергийн муж дахь, электроны 0.1-6 МэВ хүртэлх энергийн муж дахь утгуудыг тооцоолон гаргасан.

Integral proton spectra

Energy (MeV)	Total mission average flux (/cm <sup>2</sup> /s)	Total mission fluence (/cm <sup>2</sup> )	Mission segment 1	
			Average flux (/cm <sup>2</sup> /s)	Segment fluence (/cm <sup>2</sup> )
0.10	4.1043E+02	1.2943E+10	4.1043E+02	1.2943E+10
0.15	3.4642E+02	1.0925E+10	3.4642E+02	1.0925E+10
0.20	2.9558E+02	9.3213E+09	2.9558E+02	9.3213E+09
0.30	2.2931E+02	7.2315E+09	2.2931E+02	7.2315E+09
0.40	1.8319E+02	5.7771E+09	1.8319E+02	5.7771E+09
0.50	1.5774E+02	4.9745E+09	1.5774E+02	4.9745E+09
0.60	1.3847E+02	4.3669E+09	1.3847E+02	4.3669E+09
0.70	1.2268E+02	3.8687E+09	1.2268E+02	3.8687E+09
1.00	9.2734E+01	2.9245E+09	9.2734E+01	2.9245E+09
1.50	6.9850E+01	2.2028E+09	6.9850E+01	2.2028E+09
2.00	5.5565E+01	1.7523E+09	5.5565E+01	1.7523E+09
3.00	4.0404E+01	1.2742E+09	4.0404E+01	1.2742E+09
4.00	3.1187E+01	9.8352E+08	3.1187E+01	9.8352E+08
5.00	2.6125E+01	8.2387E+08	2.6125E+01	8.2387E+08
6.00	2.2568E+01	7.1170E+08	2.2568E+01	7.1170E+08
7.00	2.0581E+01	6.4904E+08	2.0581E+01	6.4904E+08
10.00	1.7055E+01	5.3786E+08	1.7055E+01	5.3786E+08
15.00	1.4807E+01	4.6694E+08	1.4807E+01	4.6694E+08
20.00	1.3627E+01	4.2973E+08	1.3627E+01	4.2973E+08
30.00	1.2167E+01	3.8371E+08	1.2167E+01	3.8371E+08
40.00	1.0986E+01	3.4645E+08	1.0986E+01	3.4645E+08
50.00	9.9829E+00	3.1482E+08	9.9829E+00	3.1482E+08
60.00	8.9191E+00	2.8127E+08	8.9191E+00	2.8127E+08
70.00	7.9206E+00	2.4979E+08	7.9206E+00	2.4979E+08
100.00	5.5106E+00	1.7378E+08	5.5106E+00	1.7378E+08
150.00	2.8103E+00	8.8626E+07	2.8103E+00	8.8626E+07
200.00	1.4779E+00	4.6608E+07	1.4779E+00	4.6608E+07
300.00	4.0283E-01	1.2704E+07	4.0283E-01	1.2704E+07
400.00	1.1262E-01	3.5517E+06	1.1262E-01	3.5517E+06

1-р хүснэгт. Протоны 0.1-400МэВ энергийн муж дахь тоо хэмжээ.

1-р хүснэгтэд тооцоологдсон протоны урсгал нь дэлхийн нам тойрог замын 400 км орчмын өндөрт 2023 оноос 1 жилийн хугацаанд экваторийн хавтгайтай 51 градусын өнцөг үүсгэсэн тойрог замаар эргэлдэх үед сансрын орчноос хиймэл дагуулд нөлөөлөх байдлыг интегралчлагдсан спектр байдлаар харуулсан байна. 2-р хүснэгтэд мөн ижил хугаанд хэрэгжих даалгавар гэж үзэн электроний урсгалыг тооцоолж гаргасан үр дүн харагдаж байна. Тойрог замын протон, электроний урсгал нь нарын идэвхжилээс хамаарч цаг хугацааны хувьд тогтвортой биш байдаг учраас хиймэл дагуулын даалгавар гүйцэтгэх үеийг тооцох шаардлага үүсгэж байна. Даалгаврын сегментэд нөлөөлөх цацрагийн урсгалыг дундаж утгаар нь тооцоолж гаргасан бөгөөд стандарт хазайлтын утгуудыг оруулаагүй болно.

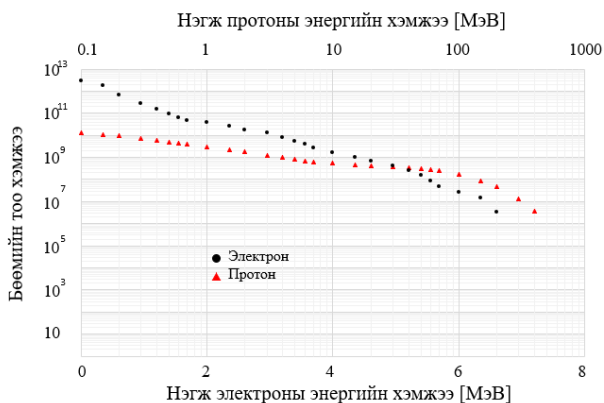
**Integral electron spectra**

Energy (MeV)	Total mission average flux (/cm <sup>2</sup> /s)	Total mission fluence (/cm <sup>2</sup> )	Mission segment 1	
			Average flux (/cm <sup>2</sup> /s)	Segment fluence (/cm <sup>2</sup> )
4.0E-02	9.4296E+04	2.9737E+12	9.4296E+04	2.9737E+12
0.10	5.5346E+04	1.7454E+12	5.5346E+04	1.7454E+12
0.20	2.0542E+04	6.4781E+11	2.0542E+04	6.4781E+11
0.30	9.0482E+03	2.8534E+11	9.0482E+03	2.8534E+11
0.40	4.8185E+03	1.5196E+11	4.8185E+03	1.5196E+11
0.50	2.8477E+03	8.9804E+10	2.8477E+03	8.9804E+10
0.60	2.0762E+03	6.5474E+10	2.0762E+03	6.5474E+10
0.70	1.5624E+03	4.9272E+10	1.5624E+03	4.9272E+10
0.80	1.2373E+03	3.9019E+10	1.2373E+03	3.9019E+10
1.00	8.4098E+02	2.6521E+10	8.4098E+02	2.6521E+10
1.25	5.7605E+02	1.8166E+10	5.7605E+02	1.8166E+10
1.50	3.9601E+02	1.2488E+10	3.9601E+02	1.2488E+10
1.75	2.6596E+02	8.3874E+09	2.6596E+02	8.3874E+09
2.00	1.7891E+02	5.6421E+09	1.7891E+02	5.6421E+09
2.25	1.2216E+02	3.8525E+09	1.2216E+02	3.8525E+09
2.50	8.3536E+01	2.6344E+09	8.3536E+01	2.6344E+09
2.75	5.2585E+01	1.6583E+09	5.2585E+01	1.6583E+09
3.00	3.3445E+01	1.0547E+09	3.3445E+01	1.0547E+09
3.25	2.1155E+01	6.6715E+08	2.1155E+01	6.6715E+08
3.50	1.3469E+01	4.2476E+08	1.3469E+01	4.2476E+08
3.75	8.0746E+00	2.5464E+08	8.0746E+00	2.5464E+08
4.00	4.8698E+00	1.5357E+08	4.8698E+00	1.5357E+08
4.25	2.7476E+00	8.6648E+07	2.7476E+00	8.6648E+07
4.50	1.5500E+00	4.8880E+07	1.5500E+00	4.8880E+07
4.75	8.6725E-01	2.7350E+07	8.6725E-01	2.7350E+07
5.00	4.8336E-01	1.5243E+07	4.8336E-01	1.5243E+07
5.50	1.0680E-01	3.3681E+06	1.0680E-01	3.3681E+06
6.00	1.8538E-02	5.8463E+05	1.8538E-02	5.8463E+05
6.50	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
7.00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

2-р хүснэгт. Электроны 0.1-7МэВ энергийн муж дахь тоо хэмжээ.

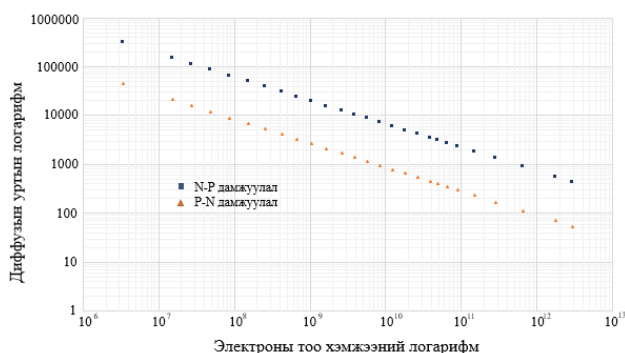
**V. ҮР ДҮН**

Тооцоололд авсан нэгж талбайд харгалзах протоны тоо хэмжээг нэгж цэнэглэгдсэн бөөмсийн энергийн утгаас хамааруулан дараах графикаар харуулав.

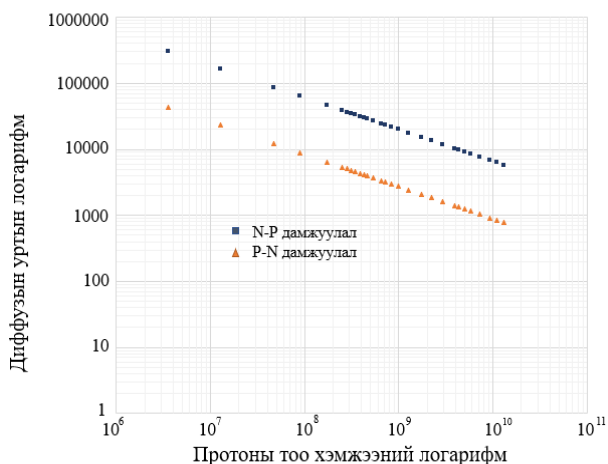


8-р зураг. Электрон болон протоны хэмжээ нэгж бөөмийн энергийн хэмжээнээс хамаарах хамаарлын харьцаа

Тооцооллын дозын утгуудаа ашиглан диффузийн урт хэрхэн өөрчлөгдөхийг (1) ба (2) томъёогоор тооцоолон, графикаар илэрхийлэв.

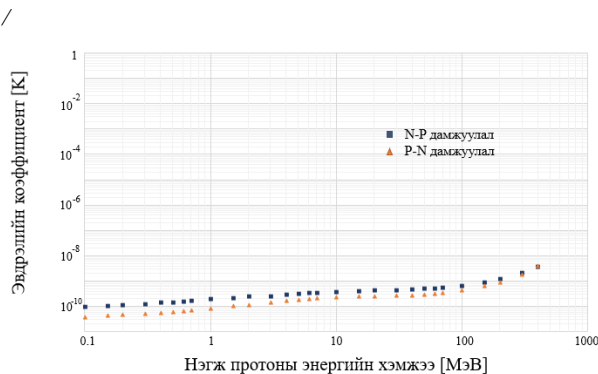


9-р зураг. Диффузийн урт электроны тоо хэмжээнээс хамаарах хамаарал

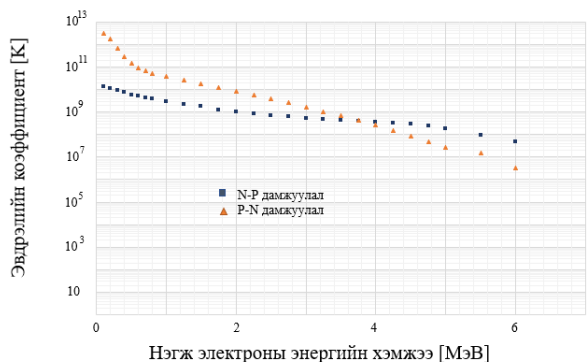


10-р зураг. Диффузийн урт протоны тоо хэмжээнээс хамаарах хамаарал

11-р зурагт томъёо (5)-г ашиглан нарны зайн эвдрэлийн коэффициент цэнэглэгдсэн бөөмсийн хэмжээнээс хэрхэн хамаарахыг харуулав.

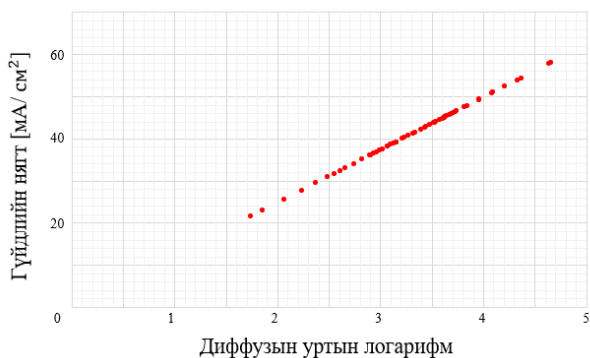


11-р зураг. Эвдрэлийн коэффициент нэгж протоны энергийн хэмжээнээс N-P болон P-N дамжууллын үед хамаарах хамаарлын харьцаа



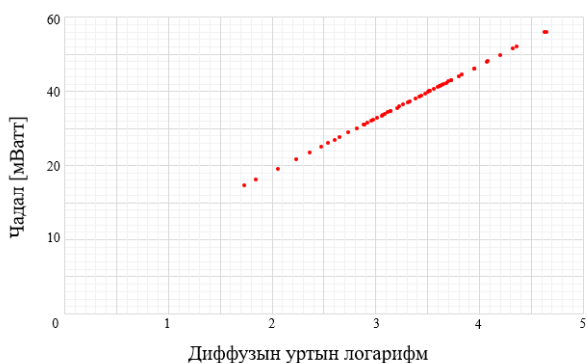
12-р зураг. Эвдрэлийн коэффициент нэгж электроны энергийн хэмжээнээс N-P болон P-N дамжууллын үед хамаарах хамаарлын харьцаа

13-р зурагт гүйдлийн нягт дээр тооцоолсон диффузын уртын логарифмаас хамаарах хамаарлыг харуулав.



13-р зураг. Гүйдлийн нягтын утга бөөмийн үйлчилсний дараах диффузын уртын логарифмын утгаас хамаарах хамаарал

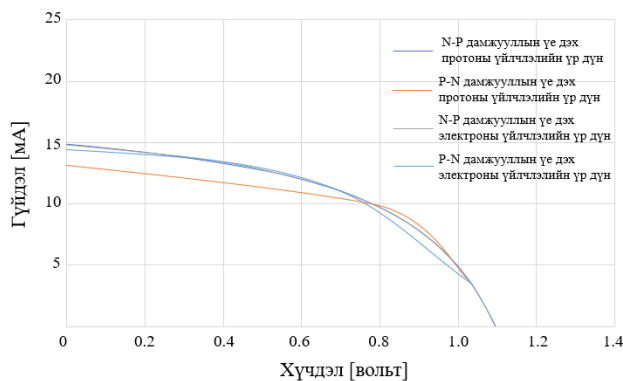
14-р зурагт нарны зайн чадлын утга дээр тооцоолсон диффузын уртын логарифмын утгаас хэрхэн хамаарахыг үзүүлэв.



14-р зураг. Максимум чадлын утга бөөмсийн үйлчлэлд өртсөний дараах диффузын уртын логарифмаас хамаарах хамаарал

15-р зурагт цэнэглэгдсэн бөөмс буюу электроны протоноор үйлчлэгдсэний дараа нарны зайн чадварын алдагдлыг харьцуулан харуулав. Үүнд

бага энергийн муж дахь энерги шингээлт болон харилцан үйлчлэлийг тооцоолоход төвөгтэй, нөлөөлөл багатай учир энэхүү судалгааны тооцоололд тооцолгүй орхисон болно. [7]



15-р зураг. Протоны урсгалд өртсөний дараах гүйдлийн утга хүчдэлийн утгаас хамаарах хамаарал

## VI. ДҮГНЭЛТ

Тооцооллын үр дүнд хиймэл дагуулын даалгавар гүйцэтгэх хугацаа буюу нэг жилийн хугацааны дараа нарны зайн гаргаж чадах гүйдлийн нягт, максимум чадлыг дараах хүснэгтэд дундажлан үзүүлэв.

		Диффуз урт (мкм)	Гүйдэл (мА)	Чадал (мВт)	Хүчдэл (В)
Протон	n-p	3.897	8.22	7.42	0.03
	p-n	0.547	-11.59	1.28	0.68
Электрон	n-p	3.567	-0.41	4.74	-0.09
	p-n	0.504	-20.39	-1.44	0.07

3-р хүснэгт. Нарны зайн цэнэглэгдсэн бөөмсийн урсгалд өртөн бүтэн жил өнгөрөхөд түүний максимум чадал, гүйдлийн өөрчлөгдөх утга.

Эндээс үзэхэд сансрын цэнэгтэй бөөмсийн үйлчлэлийн нөлөөг томъёо (1,2,3,4,5,6)-г ашиглан тооцоолоход нарны зайн ажиллах чадвар 3-р хүснэгтэд үзүүлсэнээр өөрчлөгдсөн харагдаж байна. Энд максимум чадлын үзүүлэлт тодорхой хувиар буурсан байна.

Иймээс КХОВ25-05Х3F-TR загварын монокристалл хагас дамжуулагч материал бүхий нарны зайг ашиглахдаа чадлын төсвийг тухайн бууралтад тохируулан гаргаж ажиллагааны горимыг тодорхойлох боломжтой гэж дүгнэж байна.

## НОМЗҮЙ

[1] <https://www.anysolar.biz/Gen3> (Anysolar, n.d.)

[2] Spacecraft Environment Interaction, Daniel Hastings, Henry Garrett

[3] Handbook of Space-radiation Effects on Solar-cell Power Systems, 1963, William C. Cooley, Robert J. Janda, National Aeronautics and Space Administration

[4] Denney, J. M., Downing, R. G. and Van Atta, W. K., " Charged Particle Radiation Damage in Semiconductors, V: Effect of 1 Mev Electron Bombardment on Solar Cells'; STL Report 8653-6018 -KU -000, Feb. 11, 1963.

[5] BOL and EOL characterization of azur 3G LILT solar cells for esa juice mission – 2017

[6] [www.spenvis.oma.be](http://www.spenvis.oma.be), European Space Agency

[7] Characterization of proton interaction in electronic component, Doucin, B, Patin, Y. Lochard, J.P. Beaucour, Jerome Carriere, T. Isabelle, D. Buisson, J. Corbiere, T. Bion, T. 1994