

**Қ.П. Аймағанбетов<sup>1\*</sup>, С.Қ. Шегебай<sup>1</sup>, А.У. Алдияров<sup>1</sup>,  
С.Р. Жантуаров<sup>1</sup>, Н.С. Токмолдин<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Satbayev University, Физика-техникалық институты, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>2</sup>Потсдам университеті, Германия, Потсдам қ.

\*e-mail: kazybek012@gmail.com

## **АРНАЙЫ ЖАСАЛҒАН ТӨМЕН ТЕМПЕРАТУРАЛЫ МИКРОКРИОГЕНДІК ӨЛШЕУ ҰЯШЫҒЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП ИМПЕДАНС СПЕКТРОСКОПИЯ ӘДІСІ АРҚЫЛЫ КҮН ЭЛЕМЕНТТЕРІН ЭЛЕКТРОФИЗИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ**

Мақалада гетерооткелді кремнийлі және перовскитті Күн батареяларының екі типіне арналған зерттеулер ұсынылған. Зерттеулер импеданстық спектроскопия әдісімен 100 Гц-тен 5 МГц-ке дейінгі жиілікте 128-ден 299 К-ге дейінгі температура диапазонында жүргізілді. Бұл температура диапазонында өлшеулер арнайы жасалған микрокриогендік ұяшықтың көмегімен жүргізілді. Бұл жұмыста микрокриогендік ұяшықтың негізгі құрылымы толық сипатталған. Арнайы ұяшық 16 К-дан бөлме температурасына дейінгі аралықта жұмыс істей алады және универсалды үш электрлік контактісімен жабдықталған, бұл жалпақ қабыршақты үлгілерді және көлемдік үлгілердің электрофизикалық қасиеттерін зерттеуге мүмкіндік береді. Жүргізілген зерттеулер барысында қараңғы ортада активті және реактивті кедергілері, сондай-ақ жоғарыда көрсетілген әр түрлі температурадағы Найквист қисықтары туралы мәліметтер алынды. Алынған нәтижелерде температуралық фактор Күн батареяларының электрофизикалық сипаттамаларын өлшеуге тікелей әсерін көрсетеді және олардың зерттеулері қазіргі кезде өзекті болып табылады.

Осылайша, әр түрлі төмен температуралы зерттеулерді жүргізуге мүмкіндік беретін және өзіндік ерекше құрастыруы мен жобаланған өлшеу құрылғысын қолдана отырып, жаңартылмалы энергияда перспективалы үлгілердің электрофизикалық қасиеттері зерттелді.

**Түйін сөздер:** фотовольтаика, жартылай өткізгіштер, Күн батареялары, импеданс спектроскопиясы, төмен температуралы өлшеу, Найквист қисықтары.

**K.P. Aimaganbetov<sup>1\*</sup>, S.K. Shegebay<sup>1</sup>, A.U. Aldiyarov<sup>1</sup>,  
S.R. Zhantuarov<sup>1</sup>, N.S. Tokmoldin<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>Potsdam university, Germany, Potsdam

\*e-mail: kazybek012@gmail.com

## **Research of electrophysical properties of solar elements by impedance spectroscopy method using a specially designed low temperature microcryogenic measuring cell**

The paper presents studies of two types of solar cells: silicon heterojunction and perovskite. The investigations were carried out by the method of impedance spectroscopy in the frequency range from 100 Hz to 5 MHz at a rather wide temperature range from 128 to 299 K. Measurements at this temperature range were carried out using a specially designed microcryogenic cell. The basic structure of a microcryogenic cell is also described in detail in this work. The cell is capable of operating in the range from 16 K to room temperature and is equipped with three contacts, which makes it possible to study the electrophysical properties of both flat and bulk samples. In the course of the studies carried out, data were obtained on the dark active and reactive resistances, as well as Nyquist curves at the above different temperatures. The results obtained demonstrate the clear influence of environmental factors, such as the temperature of the ambient samples, on the measurements of the electrophysical characteristics of solar cells, the studies of which are relevant today. Thus, the electrophysical properties of samples promising in renewable energy have been studied using a specialized method for studying semiconductor devices (impedance spectroscopy) and a measuring device of its own assembly and design, which makes it possible to supplement research by varying and creating low temperatures surrounding the samples.

**Key words:** photovoltaics, semiconductors, solar cells, impedance spectroscopy, low temperature measurements, Nyquist curves.

К.П. Аймағанбетов<sup>1\*</sup>, С.К. Шегебай<sup>1</sup>, А.У. Алдияров<sup>1</sup>,  
С.Р. Жантуаров<sup>1</sup>, Н.С. Токмолдин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Физико-технический институт, Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup>Потсдамский университет, Германия, г. Потсдам

\*e-mail: kazybek012@gmail.com

### Исследование электрофизических свойств солнечных элементов методом импеданс-спектроскопии с применением специально сконструированной низкотемпературной микрокриогенной измерительной ячейки

В работе приведены исследования двух типов солнечных элементов: кремниевого гетеропереходного и перовскитного. Исследования были проведены методом импеданс спектроскопии в частотном диапазоне от 100 Гц до 5 МГц при достаточно обширном температурном диапазоне от 128 до 299 К. Измерения при данном диапазоне температур проводились с применением специально разработанной микрокриогенной ячейки. Принципиальное устройство микрокриогенной ячейки также подробно описано в рассматриваемой работе. Ячейка способна работать в диапазоне от 16 К до комнатной температуры, оснащена тремя контактами, что обеспечивает возможность исследовать электрофизические свойства как плоских, так и объёмных образцов. В ходе проведённых исследований были получены данные по темновым активным и реактивным сопротивлениям, а также кривые Найквиста при вышеуказанных различных температурах. Полученные результаты демонстрируют наглядное влияние факторов внешней среды, таких как температура окружающей среды, на измерения электрофизических характеристик солнечных элементов, исследования которых актуальны на сегодняшний день. Таким образом, изучены электрофизические свойства перспективных в возобновляемой энергетике образцов, с применением специализированного метода исследования полупроводниковых устройств (импеданс-спектроскопия) и измерительного устройства собственной сборки и конструкции, позволяющего дополнять исследования варьированием и созданием низких температур, окружающей среды.

**Ключевые слова:** фотовольтаика, полупроводники, солнечные элементы, импеданс-спектроскопия, низкотемпературные измерения, кривые Найквиста.

## Кіріспе

Атмосфералық қоршаған орта параметрлері зерттелетін үлгілердің электрофизикалық өлшеу сапасына әсер ететіні белгілі [1]. Бұл тұрғыда төмен температурада жүргізілетін жартылай өткізгіш материалдардың қасиеттерін өлшеу кезінде байқалады. Мұндай жағдайларда негізгі проблемалар атмосфералық булардың немесе газдардың үлгіге конденсациясы болып табылады және сигналдың бұрмалануына және жоғалуына әкелуі мүмкін.

Зерттеу үлгісінің температурасын және оның айналасындағы атмосфераны тұрақтандыру – төмен температуралық өлшеулерді жүргізу бағытының маңызды шарты болып табылады. Мұндай өлшеулерді жүргізу үшін әдетте криостаттар (немесе жабық циклді салқындату жүйелері) қолданылады [2-6]. Сонымен қатар, өлшеудің белгілі бір түрін жүргізу, әдетте, үлгілердің белгілі бір түріне, мөлшеріне және формасына бейімделген жеке криостаттың немесе ерекше өлшеу ұяшығының болуын талап етеді [7-15]. Сонымен қатар, материалдардың қасиеттерін жан-жақты зерттеудегі техникалық маңызды міндеттердің бірі – бір ғана өлшеу

құралын қолдана отырып, бір-бірін толықтыратын және ақпараттар беретін бірнеше түрлі өлшеулер жүргізу мүмкіндіктерін іздеу. Бұл Күн батареясының интерфейстерінде болып жатқан құбылыстарды терең түсінуге мүмкіндік береді. Осы мақсатта бірнеше Күн батареясының электрофизикалық қасиеттерін түсіну мақсатында бірнеше ғылыми жұмыстар жүргізілген [16-22].

Импеданс спектроскопиясы, заряд тасымалдаушылардың өтпелі реакциясын анықтаудың бірден бір танымал әдістері ретінде белгілі [23-25].

Бұл мақалада материалдардың электрлік қасиеттерін зерттеуге арналған импеданс-спектроскопия әдісімен төмен температуралық өлшеу ұяшығын қолдану арқылы гетеротекелді кремнилі және органогаллоидты перовскиттік Күн элементтерінің импеданс сипаттамаларының өлшеу нәтижелері келтірілген.

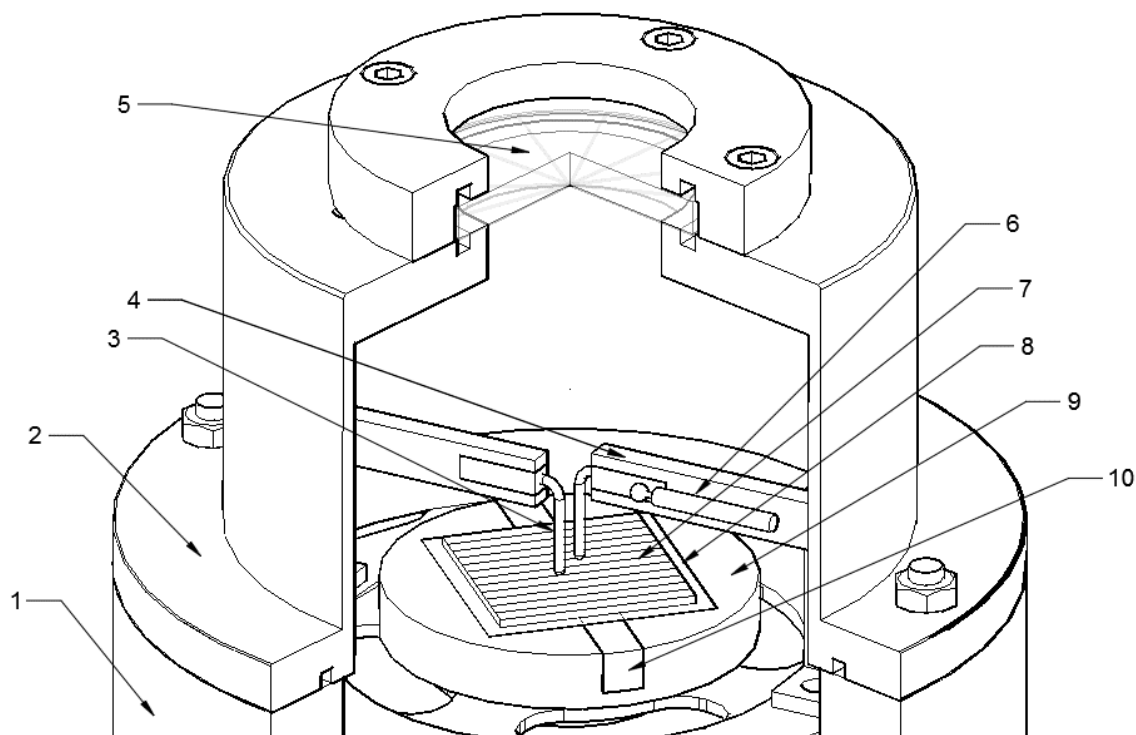
## 1. Өлшеу қондырғысын әзірлеу

Ұсынылған өлшеу ұяшығы cryomech model ST15 Cryostat микрокриогендік машинасы негізінде жасалған. Өлшеу ұяшығының негізгі

бөліктері – төсеніш, төменгі электр контактісі және жоғарғы электр контактілері болып табылады.

Салқындату процесін жақсарту және тазалықты қамтамасыз ету үшін төсеніште үлгінің айналасында разрядталған орта құру мақсатында өлшеу ұяшығымен жабдықталған, төмен температуралы өлшеу қондырғысының жалпы көрінісі 1-суретте көрсетілген. Төсеніш (9) астында орналасқан микрокриогендік машинаның жоғарғы фланеціне бекітілген. Төсеніш жоғары жылу өткізгіштікті қамтамасыз ету үшін мыстан жасалған және келесі өлшемдерге ие: диаметрі – 45 мм, биіктігі – 7 мм. Микрокриогендік машинаға төсенішті орнату үшін биіктігі 2 мм және диаметрі 25 мм болатын проекция жасалды. Металл бұрандалардың көмегімен төсеніш микрокриогендік машинаның салқындату бетіне бекітіледі. Төсеніштің төменгі бөлігінде жылу сенсорын орнатуға арналған ойық жасалады. Төсеніштің геометриялық өлшемдері Гиффорд-Мак-Магон циклі бойынша жұмыс

істейтін микрокриогендік фланецтің жоғарғы бөлігінің өлшемдеріне сәйкес келеді. Түрлі температуралық режимдерде өлшеу жүргізу үшін жүйе термореттегішпен жабдықталған. Төменгі электр контактісін орналастыру үшін ені мен тереңдігі 3 мм, төсеніштің диаметрі бойымен ойық кесілген. Контактілерге арналған корпус төсеніштің ойығына (саңылауларына) орналастырылған текстолиттік материалдан жасалған. Корпустың ұзындығы-45 мм, көлденең қимасы-3 мм<sup>2</sup> құрайды. Корпус бұрандалармен төсенішке бекітіледі. Алтын жалатылған контактілері корпусстың арнайы ойығында орнатылған. Зерттелетін үлгілердің орналасуына ыңғайлы болу үшін төсеніштің беті тегіс болуы керек. Төменгі электр контактісі жоғары өткізгіш алтын жалатылған материалдан жасалған және өлшенетін үлгінің бетіне зақым келтірместен сапалы байланыс жасау үшін икемділік пен серпімділікке ие. Корпустың осі бойымен коаксиалды өлшеу кабелін өткізуге арналған тесік жасалды.



1 – микрокриогендік машинаның корпусы; 2 – ұяшық қақпағы; 3 – электрлік контактілері;  
4 – контакті ұстағыштар; 5 – қарау терезесі; 6 – коаксиалды кабель; 7 – зерттелетін үлгі;  
8 – слюда изоляторы; 9 – төсеніш; 10 – төменгі контакт ұстағышы.

**1-сурет** – Төмен температуралы өлшеу ұяшығының сызбасы

Жоғарғы өлшеу контактісі негізгі екі тіректен тұрады: жылжымалы және тұрақты. Өлшеу тірегінің биіктігі-25 мм және жылжымалы көлденеңінен 35 мм дюралюминий материалынан жасалған. Жоғарғы контактілер жүйесінің қозғалмайтын тіреуі микрокриогенді қондырғының бортына бекітіледі. Үлгіге контактіні басу микрокриогендік машинаның бүйіріне бекітілген жылжымалы тірек пен тік бекітілген тірек арасында бекітілген спираль серіппесі арқылы қамтамасыз етіледі, ал жылжымалы тірек азимут бағытында бұрыла алады. Серіппенің күші өлшенген үлгінің бетіне зақым келтірмеу үшін таңдалады. Тіректердің екі бөлігін қосу арнайы мойынтіректің көмегімен жүзеге асырылады ( $D=4$  мм). Алтын жалатылған электр контактісі жылжымалы тіректің ұшына бекітілген. Алтын жалатылған электр контактісін жылжымалы бөлікке бекіту оқшаулағыш эпоксидті желімді қолдану арқылы жүзеге асырылды. Металл контактісі коаксиалды кабельмен байланысады.

Әрі қарай, төсенішке бекітілген үлгі (7) диаметрі 80 мм, биіктігі 60 мм және қарау терезесінің диаметрі (5) 30 мм болатын дюралюминий қақпағымен (2) жабылады. Қақпақ корпусқа болттар арқылы қосылады (1), бұл үлгіні қоршаған ортадан оқшаулауға мүмкіндік береді. Өлшеу жүйесі бекітілген микрокриогендік машинаның бортында криогенератордың корпусымен жылу байланысы жоқ және  $10^{-4}$  торр қысымда зерттеулер жүргізуге мүмкіндік береді. Микрокриогенді машинаның корпусы мен ұяшық қақпағының арасында, сондай-ақ микрокриогенді машинаның корпусы мен қарау терезесінің арасын қосу үшін резеңке сақиналы төсемдер қолданылды. (4) және (10) контактілі ұстағыштары үлгіден сигнал алуға мүмкіндік береді. Қажетті температура тұрақталғаннан кейін үлгідегі сигналдар, 50 Ом сипаттық кедергісі бар коаксиалды кабельге (6) жалғанған алтын жалатылған контактілерден (3) алынады.

Төсеніштің температурасын өлшеу және реттеу үшін Silicon diode, Scientific Instruments, Inc. Model Si-400, типті температура сенсоры орнатылды, ол Scientific Instruments, Inc. компаниясының 9600-1 модельдік температура реттегішімен басқарылады. Зерттелетін үлгінің нақты температурасы сыртқы жылу ағынының

жылу балансына, үлгінің жылу өткізгіштігіне және электр оқшаулағыш материалға байланысты белгіленеді. Үлгінің температурасын дәл өлшеу үшін, үлгіге өлшеу қателігі 0,5K болатын LakeShore E-типті термопара қосымшасы орнатылады.

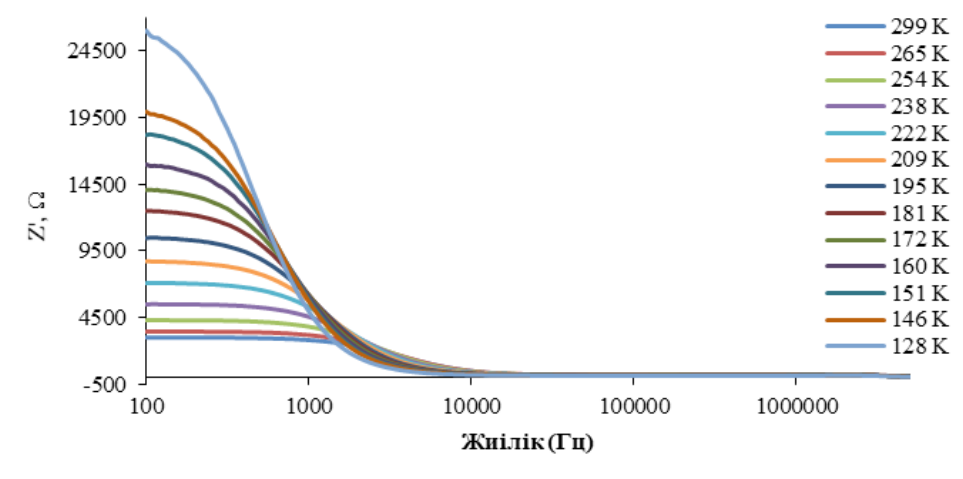
## 2. Күн элементтерінің сипаттамаларын зерттеу үшін төмен температуралы микрокриогендік ұяшықты қолдану

Әрі қарай, әзірленген өлшеу ұяшығының көмегімен жартылай өткізгіш үлгілерді импеданс спектроскопиясымен өлшеу жүргізілді. Зерттелетін үлгілер ретінде төсеніштің қарама-қарсы жағында контактілері бар стандартты кремнийлі Күн батареясы және контактілері бір бетінде орналасқан ПЭТ төсенішіндегі перовскитті Күн батареясы таңдалды.

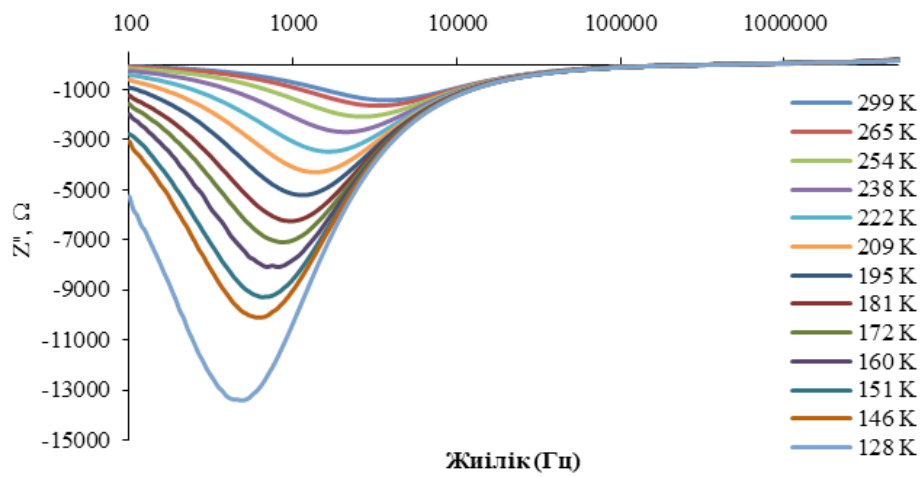
Температураға байланысты кремний үлгісінің күрделі кедергісінің өзгеруі зерттелді. Ол үшін 50 мВ амплитудасы бар айнымалы ығысу кернеуі үлгіге әр түрлі жиілікте беріледі. Қараңғы активті және реактивті кедергілерінің мәндері 2-суретте, әр түрлі температурадағы Nyquist қисықтары 3-суретте көрсетілген. Алынған мәліметтерден көріп отырғанымыздай, үлгінің күрделі кедергісі 299 К (бөлме температурасы) кезінде  $\sim 3$  кОм-ға, ал 128 К-де 25 кОм-ға дейін артады.

Сонымен қатар,  $\text{ITO/SnO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Spiro-Me-TAD}/\text{Au}$  құрылымды перовскиттік Күн элементі зерттелді. Үлгінің температурасына байланысты перовскиттік Күн элементінің қараңғы күрделі кедергісі зерттелді. Температура диапазоны бөлме температурасынан (298 К) 127 К дейін өзгерді. Перовскиттік үлгіге 100-ден 5 МГц-ке дейінгі жиілік диапазонында амплитудасы 50 мВ болатын айнымалы ығысу кернеуі берілді. Қараңғы сипаттамаларды өлшеу нәтижелері Найквист қисықтары 4-суретте көрсетілген.

Алынған мәліметтерде үлгінің кедергісі температураның төмендеуімен бірге өседі  $\sim 298$  К-де 25 кОм-нан 127 К-де 120 кОм-ға дейін. Алынған спектрлер күрделі кедергілердің жоғары өлшенетін шамаларына байланысты төмен температурадағы мәндердің айтарлықтай кең таралуын көрсетеді.

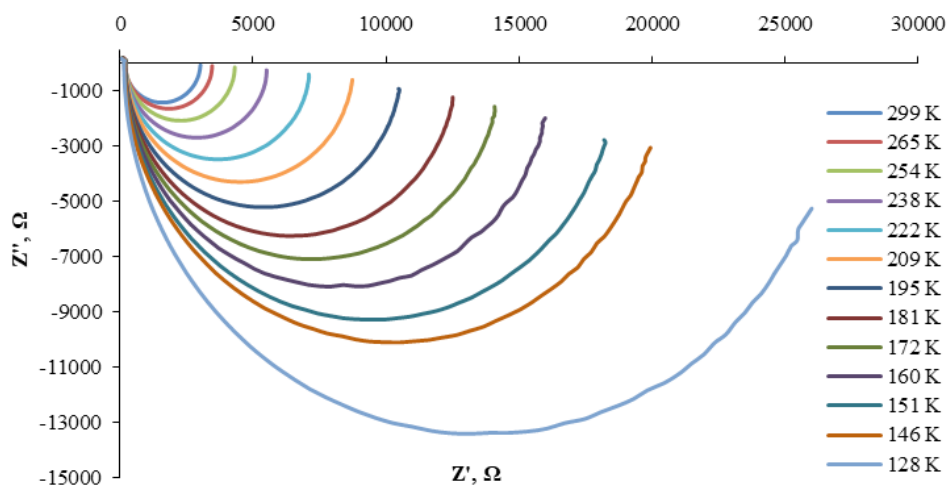


а)

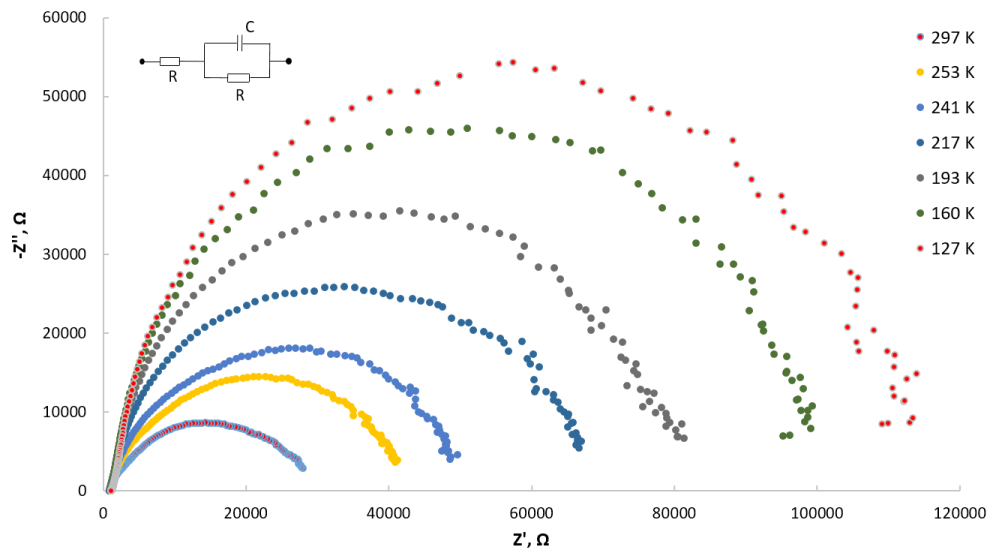


б)

2-сурет – Кремний Күн элементінің қараңғы кедергісінің нәтижелері:  
а) активті б) реактивті



3-сурет – Өр түрлі температурадағы Найквист қисықтары



4-сурет – 127-298 К температура диапазонындағы перовскит элементінің Найквист қисықтары

### Қорытынды

Бұл жұмыста төмен температуралы қондырғыға арналған өлшеуіш ұяшықты жасаудың нұсқасы ұсынылған. Бұл үлгінің екі жағына қосылған электр контактілері бар жалпақ жұқа қабатты үлгілерді төмен температурада өлшеуге мүмкіндік береді. Төмен температуралы өлшеу ұяшығының негізгі элементтері – бұл

арнайы пішінді мыс төсеніші және бір төменгі және екі жоғарғы контактілерден тұратын электрлік үш контактілі өлшеу жүйесі. Осы криогендік ұяшықтың көмегімен 120-дан 300 К-ге дейінгі температураның кең диапазонында кремний мен органогаллоидты перовскиттерге негізделген Күн элементтерінің күрделі кедергісінің жиілікке тәуелділігінің спектрлері өлшенеді.

### Әдебиеттер

- 1 Flickett, F. Electrical properties of materials and their measurement at low temperatures. – U.S. Department of Commerce: National Bureau of Standards, 1982 – 70 p.
- 2 Fleming R. M., Seager, C. H., Lang, D. V., Campbell, J. M. Injection deep level transient spectroscopy: An improved method for measuring capture rates of hot carriers in semiconductors //Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 118. – №. 1. – P. 015703.
- 3 Кондрик А.И., Ковтун Г.П. Физические основы метода нестационарной спектроскопии глубоких уровней, Препринт ХФТИ 97-7. -Харьков:ННЦ ХФТИ, 1997. – 34 с.
- 4 Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. – Л.: Наука, 1981. – 176 с.
- 5 Lang D.V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // J. Appl. Phys. – 1974. – Vol. 45. – P. 3023-3032.
- 6 Аймағанбетов Қ.П., Жолдыбаев К.С., Жантуаров С.Р., Рахимбаев Б.С, Токмолдин Н.С. Реализация метода нестационарной спектроскопии глубоких уровней в условиях лабораторного эксперимента для студентов вузов //Recent Contributions to Physics (Rec. Contr. Phys.). – 2018. – V. 60. – P. 148-156.
- 7 Ekin J. W., Zimmerman G. O. Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements: Cryostat Design, Material Properties, and Superconductor Critical-Current Testing //Physics Today. – 2007. – Vol. 60. – P. 67.
- 8 Flynn T. M. Cryogenic Fluids //Cryogenic Engineering, New York, Marcel Dekker Inc. – 1997. – P. 158-180.
- 9 Parma V. Cryostat Design// CERN Yellow Report CERN-2014-005 – 2014. – P 353-399.
- 10 Arka Das, P. Das, S.Banerjee, A. Reza, K.D. Bannerjee, A Study for Developing a Cryostat for Circuit Testing at Low Temperatures // Excerpt from the Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Pune – Pune, 2015 – 5 p.
- 11 Moliá J., Ibarra A., Mariñeda J., Zamarró J.M., Hernández A., Dielectric properties measurement system at cryogenic temperatures and microwave frequencies. – Madrid: Ciemat 735, 1994 – 23 p.
- 12 Singh M., Chaujar R., Rakshit R. K. Cryogenic measurement set-up for characterization of superconducting nano structures for single-photon detection applications //Current Science. – 2018. – Vol. 115. – №. 6. – P. 1085-1090.

- 13 Novak P., Pechousek, J., Malina, O., Navarik, J., Machala, L. Liquid nitrogen cryostat for the low-temperature Mössbauer spectra measurements //AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1622. – №. 1. – P. 67-71.
- 14 Hemin V. Thakkar. Design and development of ss-304 cryostat for low temperature electrical transport measurements// Journal of Sci-Tech Research – 2010. – Vol. 1 – Issue 2 – P. 30-32.
- 15 Singh Y. Design of a Sample Holder for Low Temperature Electrical Conductivity Measurements //International Journal of Modern Physics: Conference Series. – World Scientific Publishing Company – 2013. – Vol. 22. – P. 741-744.
- 16 Luongo G., Giubileo F., Genovese L., Iemmo L., Martucciello N., di Bartolomeo, A. I-V and C-V Characterization of a High Responsivity Graphene/Silicon Photodiode with Embedded MOS Capacitor. //Nanomaterials. – 2017. – Vol. 7. – №. 7. – P. 158.
- 17 Alialy S., Tecimer, H., Uslu, H., Altindal, S. A comparative Study on Electrical Characteristics of Au/N-Si Schottky Diodes, with and without Bi-Doped PVA Interfacial Layer in Dark and under Illumination at Room Temperature. Nanomed. //J Nanomed Nanotechol. – 2013. – Vol. 4. – №. 3. – P. 1000167.
- 18 Daliento S., Lancellotti L. 3D Analysis of the performance degradation caused by series resistance in concentrator solar cells. //Solar Energy. – 2010. – Vol. 84. – №. 1. – P. 44-50.
- 19 Bellone S., Licciardo G.D., Daliento S., Mele L. Experimental measurements of majority and minority carrier lifetime profile in Si epilayers by the use of an improved OCVD method. //IEEE electron device letters. – 2005. – Vol. 26. – №. 7. – P. 501-503.
- 20 Daliento S., Tari O., Lancellotti L. Closed Form Analytical Expression for the Conductive and Dissipative Parameters of the MOS-C equivalent Circuit. //IEEE transactions on electron devices. – 2011. – Vol. 58. – №. 10. – P. 3643-3646.
- 21 Ershov M., Liu H.C., Li L., Buchanan M., Wasilewski Z.R., Jonscher A.K. Negative capacitance effect in semiconductor devices //IEEE Transactions on Electron devices. – 1998. – Vol. 45. – №. 10. – P. 2196-2206.
- 22 Bisquert J., Bertoluzzi L., Mora-Serao I., Garcia-Belmonte G. Theory of Impedance and Capacitance Spectroscopy of Solar Cells with Dielectric Relaxation, Drift Diffusion Transport, and Recombination //The Journal of Physical Chemistry C. – 2014. – Vol. 118. – №. 33. – P. 18983-18991.
- 23 Yadav P., Pandey K., Bhatt V., Kumar M., Kim, J. Critical aspects of impedance spectroscopy in silicon solar cell characterization: A review. //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 76. – P. 1562-1578.
- 24 Brana A.F.; Fornies E.; Lopez N.; Garcia B.J. High Efficiency Si Solar Cells Characterization Using Impedance Spectroscopy Analysis //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2015. – Vol. 647. – №. 1. – P. 012069.
- 25 Kumar R.A., Suresh M.S., Nagaraju J. Measurement of AC parameters of gallium arsenide (GaAs/Ge) solar cell by impedance spectroscopy //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2001. – Vol. 48. – №. 9. – P. 2177-2179.

## References

- 1 F. Flickett, Electrical properties of materials and their measurement at low temperatures, (U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1982), 70 p.
- 2 R.M. Fleming, C.H. Seager, D.V. Lang, and J.M. Campbell, Journal of Applied Physics 118, 015703 (2015).
- 3 A.I. Kondrik, G.P. Kovtun, Fizicheskie osnovi metoda nestacionarnoi spektroskopii glubokikh urovnei, (Khar'kov:NNTS KHFTI, 1997), 34 p. (in Russ).
- 4 L.S. Berman, A.A. Lebedev, Yemkostnaya spektroskopiya glubokikh tseftrov v poluprovodnikakh, (L.: Nauka, 1981), 176 p. (in Russ).
- 5 D.V. Lang, J. Appl. Phys. 45, 3023-3032 (1974).
- 6 K.P. Aimaganbetov, K.S. Zholybayev, S.R. Zhantuarov, B.S. Rakhimbayev, and N.S. Tokmoldin, Rec. Contr. Phys. 60, 148-156 (2018). (in Russ).
- 7 J. Ekin, Experimental techniques for low-temperature measurements: cryostat design, material properties and superconductor critical-current testing, (Oxford U. Press, New York, 2006), 673 p.
- 8 T.M Flynn, Cryogenic Fluids” in Cryogenic Engineering, (Marcel Dekker Inc., New York, 1997.), p. 158-180.
- 9 V. Parma, CERN Yellow Report CERN-2014-005, 353-399 (2014).
- 10 A. Das et al., Excerpt from the Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Pune (Pune, 2015), 5p.
- 11 J. Moliá, A. Ibarra, J. Mariñeda, J.M. Zamarro and A. Hernández, Dielectric properties measurement system at cryogenic temperatures and microwave frequencies, (Ciemat 735, Madrid, 1994), 23 p.
- 12 M. Singh, R. Chaujar, and R.K. Rakshit, Current Science, 115, 1085-1090, (2018).
- 13 P. Novak, J. Pechousek, O. Malina, J. Navarik, and L. Machala, AIP Conference Proceedings 1622, 67-71, (2014).
- 14 H.V. Thakkar, Journal of Sci-Tech Research 1, 30-32 (2010)
- 15 Y. Singh, International Journal of Modern Physics, Conference Series, World Scientific Publishing Company 22, 741-744 (2013).
- 16 G. Luongo, F. Giubileo, L. Genovese, L. Iemmo., N. Martucciello and A.di Bartolomeo , Nanomaterials 7, 158 (2017).
- 17 S. Alialy H. Tecimer, H.Uslu and S. Altindal, Nanomed. Nanotechnol., 4, 3 (2013).
- 18 S. Daliento and L.Lancellotti, Sol. Energy 84, 44–50 (2010).
- 19 S. Bellone, G.D. Licciardo, S. Daliento and L. Mele, IEEE Electron Devices Lett. 26, 501–503 (2005).
- 20 S. Daliento, O. Tari and L. Lancellotti, IEEE Trans. Electron Devices 58, 3643–3646 (2010).
- 21 M. Ershov, H.C. Liu, L. Li, M. Buchanan, Z.R. Wasilewski and A.K. Jonscher, IEEE Trans. Electron Devices 45, 2196–2206 (1998).
- 22 J. Bisquert, L. Bertoluzzi, I. Mora-Serao and G.Garcia-Belmonte, J. Phys. Chem. 118, 18983–18991, (2014).
- 23 P. Yadav, K. Pandey, V. Bhatt, M. Kumar and J. Kim Renew. Sustain. Energy Rev. 76, 1562–1578, (2017).
- 24 A.F. , E. Fornies, N. Lopez and B.J. Garcia, J. Phys. 647, 012069 (2015).
- 25 R Anil-Kumar, M.S. Suresh and J. Nagaraju, IEEE Trans. Electron Devices 48, 2177 (2001).