

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF SILICON SOLAR CELLS
UNDER LOW-TEMPERATURE CONDITIONS
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Xaqbergenova N.F.

Berdaq atındağı Qaraqalpaq mámleketlik universiteti, 2-kurs studentı

nargizahaqbergenova@gmail.com

Amangeldieva J.T.

Berdaq atındağı Qaraqalpaq mámleketlik universiteti, 2-kurs student

jaziraamangeldieva032@gmail.com

Abstract: This study presents impedance spectroscopic analysis of silicon and perovskite solar cells in the frequency range of 100 Hz to 5 MHz and temperatures between 128 K and 299 K. A custom-designed micro-cryogenic cell operating from 16 K and suitable for various sample types was utilized. Temperature dependencies of both active and reactive resistances were obtained, along with Nyquist plots. The results demonstrate the influence of temperature on the electrophysical properties, confirming the relevance of this method for material analysis in renewable energy applications.

Keywords: photovoltaics, semiconductors, solar cells, impedance spectroscopy, low-temperature measurements, Nyquist plots.

Аннотация: В работе проведено импедансное спектроскопическое исследование кремниевых и перовскитных солнечных элементов в диапазоне частот 100 Гц – 5 МГц и температур 128–299 К. Использована разработанная микрокриогенная ячейка, работающая от 16 К, пригодная для разных типов образцов. Получены температурные зависимости активного и реактивного сопротивлений, а также кривые Найквиста. Результаты показывают влияние температуры на электрофизические свойства, что подтверждает актуальность метода для анализа материалов в возобновляемой энергетике.

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

Параметры окружающей атмосферы могут существенно влиять на точность электрофизических измерений образцов, особенно при низких температурах. В таких условиях часто возникает проблема конденсации паров или газов на поверхности образца, что может исказить измерения или снижать качество сигнала. Чтобы обеспечить надёжные результаты при низкотемпературных измерениях, необходимо стабилизировать как

температуру самого образца, так и окружающей среды. Для этого обычно применяются криостаты или специальные системы охлаждения. При этом важно, чтобы измерительное оборудование было адаптировано под форму и размеры конкретного образца. Одним из актуальных направлений является разработка универсальных измерительных установок, которые позволяют проводить разные виды исследований с одного устройства. Это помогает получить более полную картину процессов, происходящих в солнечных элементах, особенно на их интерфейсах.

Импедансная спектроскопия в таких задачах является надёжным методом, позволяющим анализировать процессы переноса заряда и другие важные характеристики полупроводниковых материалов.

В данной статье представлены результаты измерений импедансных характеристик гетеропереходных кремниевых и органогаллоидных перовскитных солнечных элементов с использованием метода импедансной спектроскопии и низкотемпературной измерительной ячейки, предназначенной для исследования электрических свойств материалов.

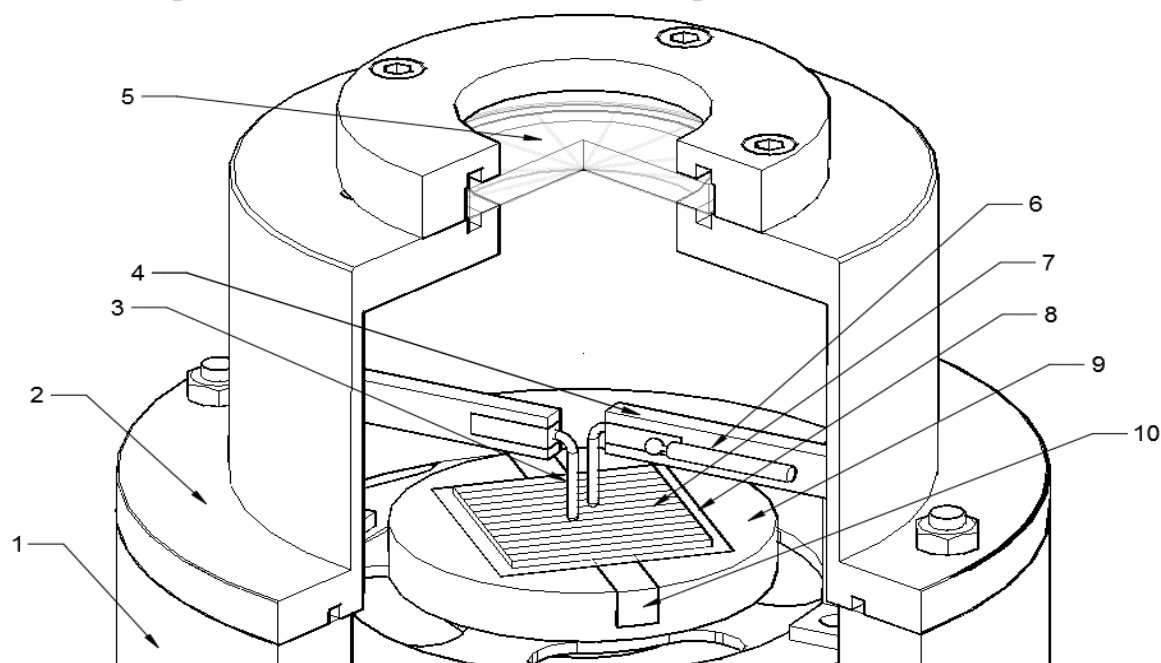
1. Разработка измерительной установки

Предлагаемая измерительная ячейка разработана на основе микрокриогенной машины модели ST15 Cryostat от компании Cryomech. Основными элементами низкотемпературной измерительной ячейки являются основание, нижний электрический контакт и верхние электрические контакты.

Для улучшения процесса охлаждения и обеспечения чистоты вокруг образца предусмотрена разряженная среда, создаваемая с помощью измерительной ячейки. Общий вид низкотемпературной измерительной установки приведён на рисунке 1. Основание (позиция 9) закреплено на верхнем фланце микрокриогенной машины. Оно изготовлено из меди для обеспечения высокой теплопроводности и имеет следующие размеры: диаметр — 45 мм, высота — 7 мм. Для установки основания на микрокриогенную машину предусмотрена проекция высотой 2 мм и диаметром 25 мм. С помощью металлических винтов основание крепится к охлаждающей поверхности микрокриогенной системы. В нижней части основания имеется углубление для установки температурного сенсора. Геометрические параметры основания соответствуют размерам верхней части фланца микрокриогенной машины, работающей по циклу Гиффорда–Мак-Магона.

Для удобного размещения исследуемых образцов поверхность основания должна быть ровной. Нижний электрический контакт изготовлен из проводящего материала с золотым покрытием и обладает гибкостью и упругостью для обеспечения надёжного электрического контакта с

поверхностью образца без повреждений. Вдоль оси корпуса предусмотрено отверстие для прохождения коаксиального измерительного кабеля.



1 – корпус микрокриогенной машины; 2 – крышка ячейки; 3 – электрические контакты; 4 – держатели контактов; 5 – смотровое окно; 6 – коаксиальный кабель; 7 – исследуемый образец; 8 – изолятор из слюды; 9 – основание (подложка); 10 – держатель нижнего контакта.

Рисунок 1 – Схема низкотемпературной измерительной ячейки

2. Применение низкотемпературной микрокриогенной ячейки для исследования характеристик солнечных элементов

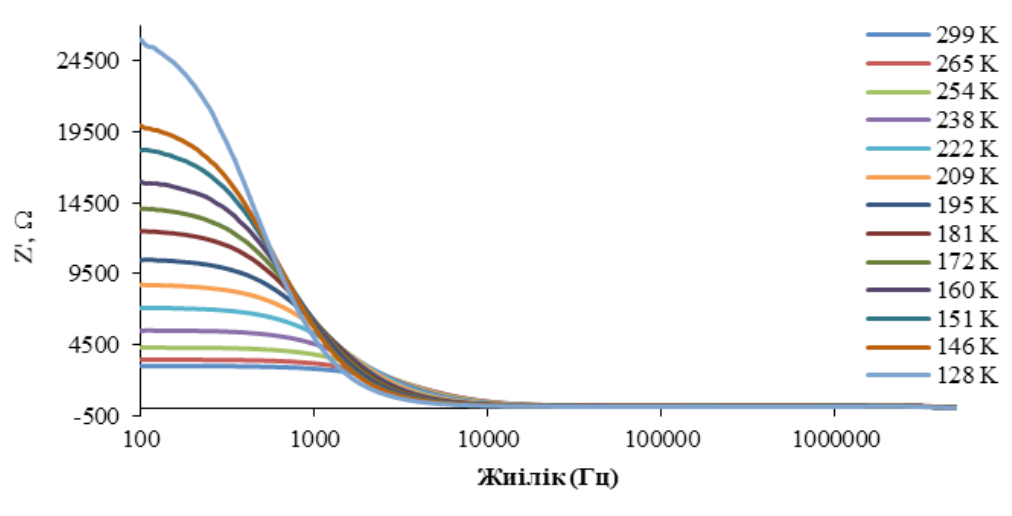
С использованием разработанной измерительной ячейки были проведены измерения полупроводниковых образцов методом импедансной спектроскопии. В качестве исследуемых образцов были выбраны: стандартный кремниевый солнечный элемент с контактами на противоположных сторонах и перовскитный солнечный элемент на подложке из ПЭТ с контактами, расположенными на одной стороне.

Исследовалось изменение комплексного сопротивления кремниевого образца в зависимости от температуры. Для этого к образцу подавалось переменное напряжение смещения с амплитудой 50 мВ на различных частотах. Значения активного и реактивного сопротивления в темноте представлены на рисунке 2, а кривые Найквиста при различных температурах — на рисунке 3. Согласно полученным данным, комплексное сопротивление образца увеличивается от ~3 кОм при 299 К (комнатная температура) до 25 кОм при 128 К.

Также был исследован перовскитный солнечный элемент со структурой ITO/SnO₂/CH₃NH₃PbI₃/Spiro-Me-TAD/Au. Изучалось комплексное

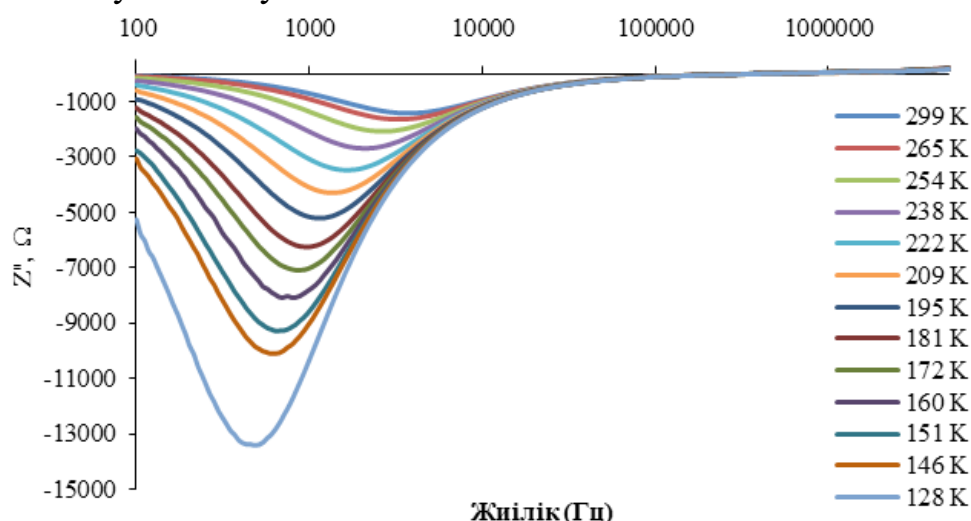
сопротивление в темноте в зависимости от температуры. Температурный диапазон варьировался от комнатной температуры (298 К) до 127 К. К образцу подавалось переменное напряжение смещения амплитудой 50 мВ в диапазоне частот от 100 Гц до 5 МГц. Результаты измерений в темноте представлены в виде кривых Найквиста на рисунке 4.

Согласно полученным данным, сопротивление образца возрастает с понижением температуры — от ~25 кОм при 298 К до 120 кОм при 127 К. Полученные спектры демонстрируют значительное расширение значений при низких температурах, что связано с увеличением измеряемых комплексных сопротивлений.



а)

Специально разработанную низкотемпературную микрокриогенную измерительную ячейку



б)

2-Рисунок – Результаты измерения тёмного сопротивления кремниевого солнечного элемента: а) активная составляющая; б) реактивная составляющая

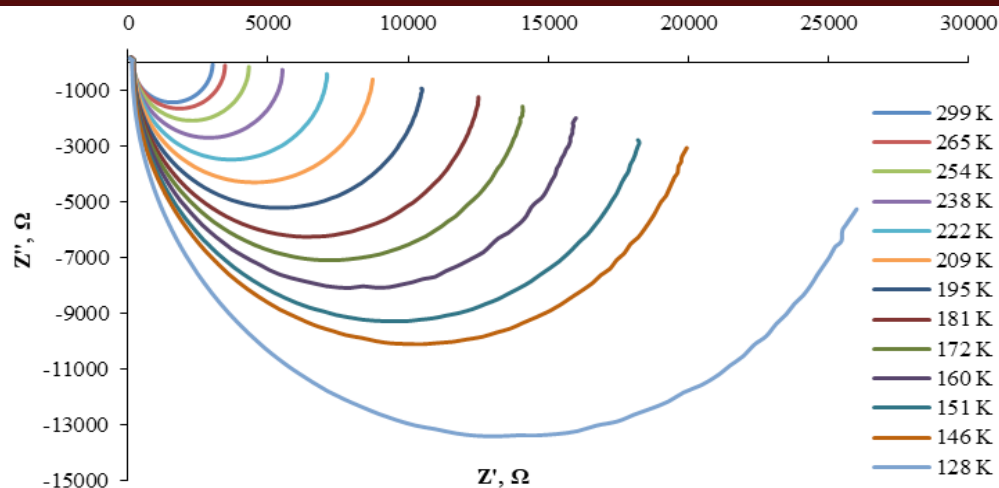


Рисунок 3 – Кривые Найквиста при различных температурах

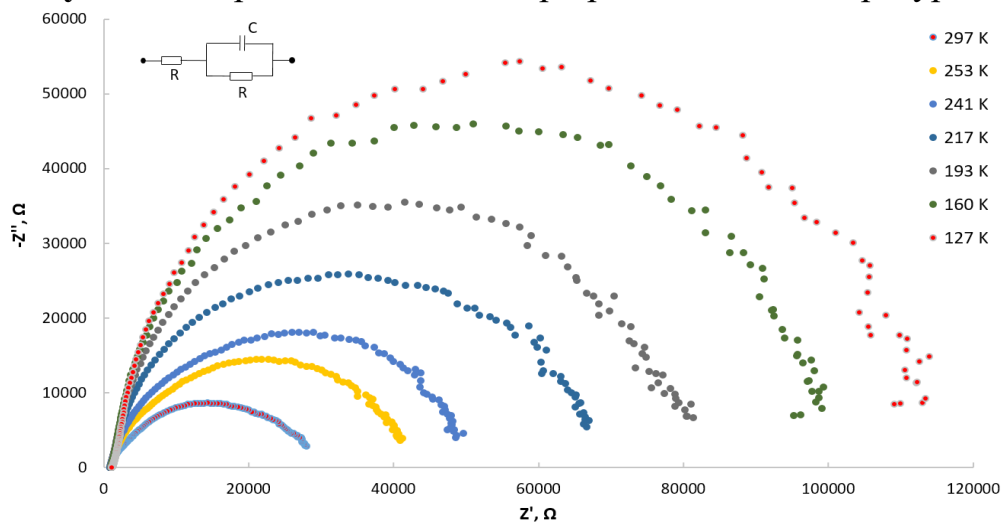


Рисунок 4 – Кривые Найквиста перовскитного элемента в температурном диапазоне 127–298 K

Заключение

В данной работе предложен вариант конструкции измерительной ячейки для низкотемпературной установки. Она позволяет проводить измерения плоских тонкоплёночных образцов с электрическими контактами, подключёнными с двух сторон, при низких температурах. Основными элементами низкотемпературной измерительной ячейки являются медное основание специальной формы и трёхконтактная измерительная система, включающая один нижний и два верхних электрических контакта. С помощью данной криогенной ячейки были измерены спектры зависимости комплексного сопротивления от частоты для солнечных элементов на основе кремния и органогалогенных перовскитов в широком температурном диапазоне от 120 до 300 K.

Литература:

1. 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.

2. Кондрик А.И., Ковтун Г.П. Физические основы метода нестационарной спектроскопии глубоких уровней, Пре-принт ХФТИ 97-7. -Харьков:ННЦ ХФТИ, 1997. – 34 с.

3. Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. – Л.: Наука, 1981. – 176 с.