

## ВЫРАЩИВАНИЕ СЛОЯ CdTe НА КРЕМНИЕВОЙ ОСНОВЕ И ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОЗДАННОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ВЛАЖНОСТЬ

И.Б.Сапаев

Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»  
Национальный исследовательский университет

Б.Сапаев

Ташкентский государственный аграрный университет, д.ф.м.н., профессор

А.Абдурахмонов

туркменский институт телекоммуникаций и информатики

Н.Н.Абдусатторов

магистрант Национального университета Узбекистана

### АННОТАЦИЯ

В данной статье речь идет о полупроводниковом материаловедении, создании гетероструктур на основе пленок кадмия теллурида полученных на Si- подложке и получения контактов на созданной системе. Морфологию полученных пленок, количество элементов в пленках их распределение и размер поликристаллических частиц изучали с помощью современных приборов. Изучено изменение вольт - амперных характеристик полученной гетероструктур в зависимости от влажности.

**Ключевые слова:** материаловедение, полупроводник, фундаментальный, металлы, кремний, машиностроение, кадмий теллур, твердый раствор, технология, вакуумная электроника, влага, датчик, эпитаксиальный слой, диффузия

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в полупроводниковом приборостроении в основном используются такие фундаментальные материалы, как кремний (Si), Германий (Ge), а также полупроводниковые соединения  $A^3B^5$  и  $A^2B^6$ , такие как арсенид галлия (GaAs), фосфид галлия (GaP), антимонид индия (InSb), кадмий используются теллурид (CdTe), сульфид кадмия (CdS) и ряд других соединений и их твердых растворов. В некоторых случаях их можно заменить одним – другим, но в ряде случаев и вовсе нет возможности заменить их друг на друга.

К этому моменту, когда изучение свойств и свойств некоторых твердых растворов находилось в исходном состоянии, некоторый класс полупроводниковых твердых растворов, о котором говорилось в теории, практически (экспериментально) не был получен вообще. Исходя из этого, до настоящего времени чрезвычайно актуальным направлением является поиск твердых растворов с полупроводниковыми свойствами с целью совершенствования методики их выращивания и упрощения управления физическими свойствами и уточнения новых областей их применения.

Следует также отметить, что соединения,  $A^3B^5$  и  $A^2B^6$ , а также твердые растворы, получаемые на их основе, являются относительно дорогими материалами.

Исходя из вышесказанного, в последнее время интересы исследователей смещаются в сторону изучения объемных и пленочных гетероструктур, состоящих из различных полупроводников.

Этот интерес, несомненно, имел бы большое значение, если бы технология получения этих гетероструктур и их электрофизические и фотоэлектрические свойства были достаточно изучены на основе кремния (Si). Областью применения пленочных и объемных полупроводниковых гетероструктур является создание различных типов датчиков [1-4], например, это могут быть датчики влажности, которые контролируют влажность окружающей среды в процессе выращивания или хранения окружающей среды или сельскохозяйственной продукции соответственно.

**Актуальность темы.** При создании полупроводниковых приборов внутри соединений  $A^2B^6$  (детекторов ядерного излучения, фотоприемников и вообще датчиков различного типа) у них светлое будущее – одним из перспективных материалов являются теллурид кадмия и сульфид кадмия. Полупроводники приобретают особое значение с точки зрения физики солнечных элементов как новый объект изучения систем Si-CdTe, Si-CdS – пленочных гетероструктур. Стоит отметить, что кремний является наиболее распространенным элементом в недрах Земли.

В настоящее время технология извлечения и очистки кремния хорошо развита, поэтому кремний является основным материалом для микроэлектроники и электронной промышленности. Сочетание преимуществ полупроводниковых свойств теллурида кадмия и сульфида кадмия с кремнием является актуальной задачей, в частности, создание гетероструктур с идеальной диаграммой диапазонов между теллуридом кадмия, сульфидом кадмия и кремнием открывает новые возможности в полупроводниковом приборостроении.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Получение широкого класса соединений и твердых растворов из полупроводниковых материалов на основе кремния, несомненно, играет важную роль в физике полупроводников и полупроводниковом приборостроении.

Поэтому в данной работе показано о том, что методом вакуумного осаждения на основе различных типов Поли - и монокристаллического кремния при давлении  $\sim 10^{-4}$  Торр, можно получить слой пленки теллурида кадмия и создать на ее основе гетероструктуру. Толщина основания 350-400 мкм [5-6].

Проведен рентгеноструктурный анализ слоя CdTe на кремниевой основе, а также проведены исследования электрофизических и фотоэлектрических свойств, чувствительности к влаге и проанализированы результаты.

Технологические условия возделывания слоя теллурида кадмия на кремниевой основе методом вакуумной сепарации (температура основания и источника, в котором должна производиться сепарация, температурный интервал, промежуточное расстояние между основанием и источником, соотношения материала сварочной и легирующей примеси и другие параметры) были определены экспериментальным методом. Перед процессом

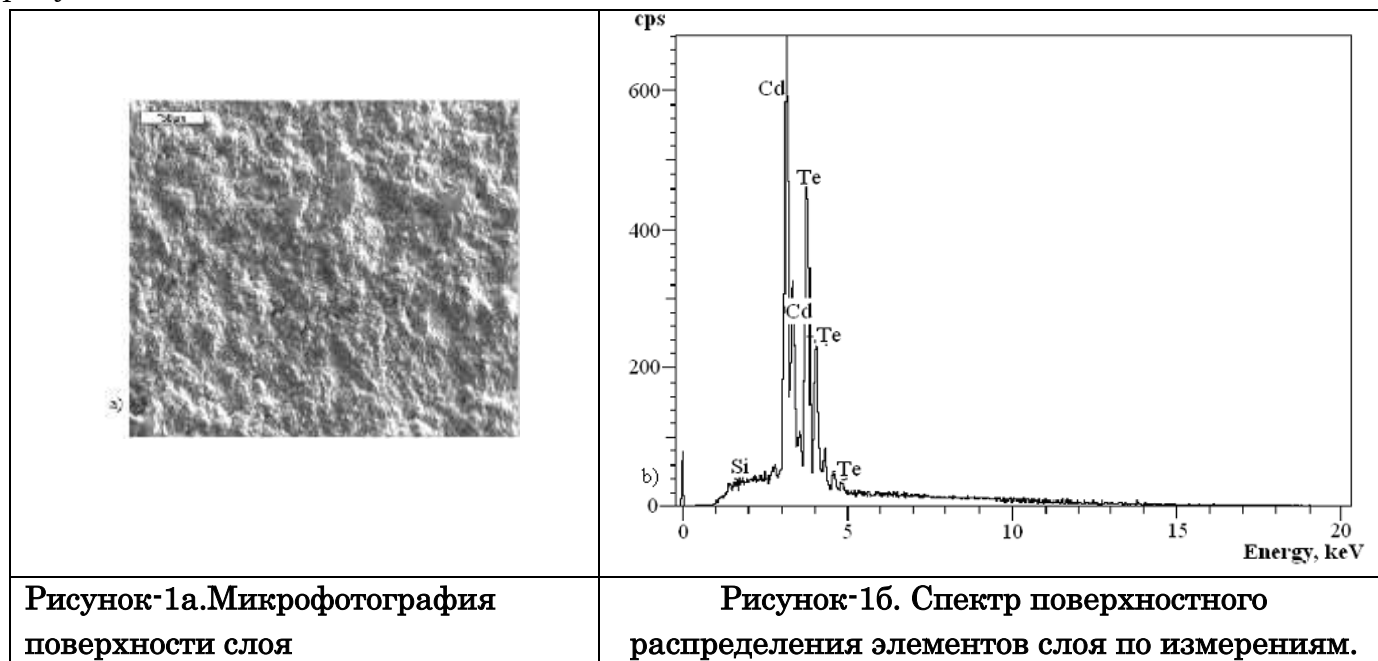
выращивания как Поли-, так и моно-кремниевые подложки прошли соответствующую механическую и химическую обработку. Следовательно, в качестве основы использовалась Кремниевая основа как n-типа, так и p-типа.

Для этой ситуации полупроводниковые кремниевые подложки (поли- или моно-кремниевые) служат составной частью гетероструктур и полупроводниковых приборов на их основе.

Поэтому межфазное кремниевое основание и слой соединения  $A^2B^6$ , образующиеся в процессе роста, приобретают особенно важное значение по отношению к границе раздела (переходной области), кремниевому основанию и растущим слоям, ещё определяют дальнейшую характеристику получаемых слоев.

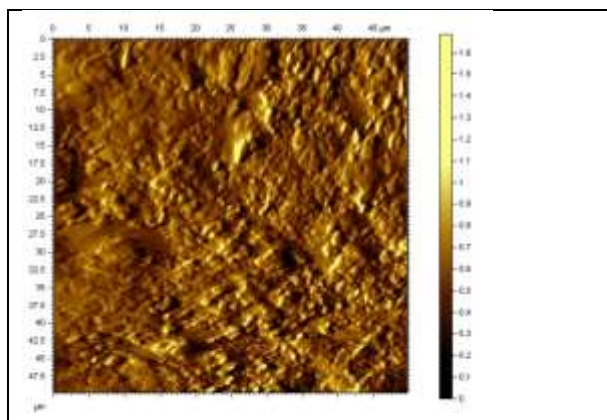
С практической точки зрения применение Si-CdTe - гетероструктуры в широком смысле, на наш взгляд, представляется перспективной системой при создании различных полупроводниковых приборов и устройств, в том числе датчиков влажности.

Исследовано структурное распределение химических элементов по поверхности полученного слоя. Анализ проводился с помощью EDS LINK ISIS (энергия – дисперсионный спектрометр) на микроаналитическом комплексе Jeol – JXA – 8900 с погрешностью измерения  $\pm 2\%$ . Сёмка условная  $V = 20kV, I = 10nA$ . Эталоном являются Si, Te и Cd в чистом виде. Результаты измерений и микрофотографии представлены на рисунке 1.

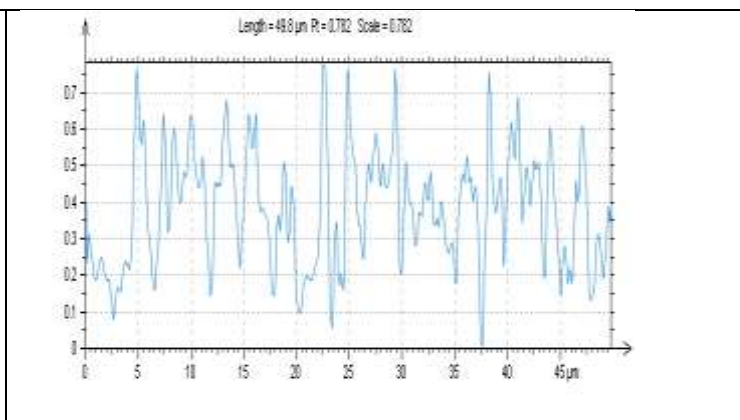


В целях наглядного понимания полученных слоев на атомно – силовом микроскопе “Agilent Technologies 5500 AFM – Mode III – Complete BA210” представлены результаты исследования поверхности слоя, изображения рельефа со стороны слоя, 3D-фотография, а также размеры и распределение поликристаллических частиц в слое (рис.2).

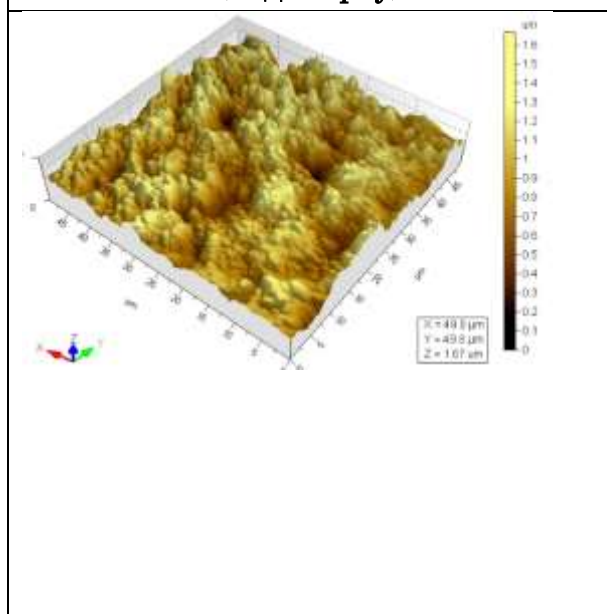




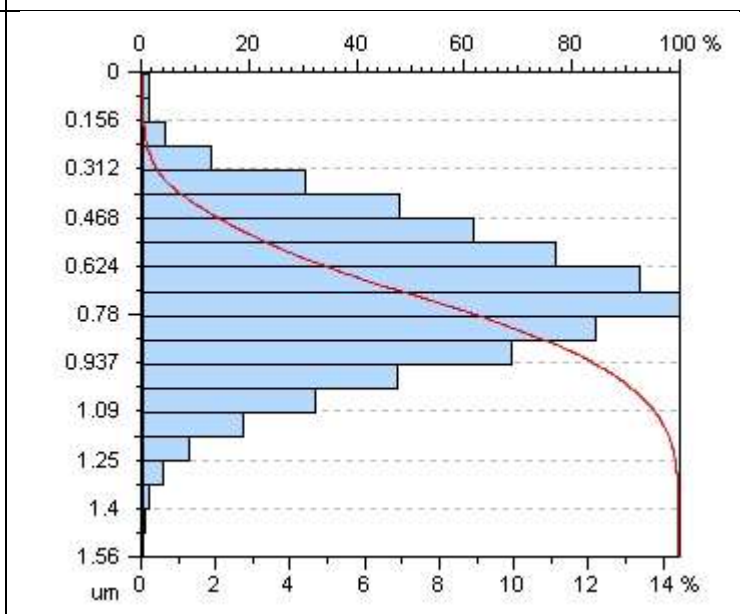
**Рисунок-2а. Si-топография поликристаллической плёнки, выращенной на основе (вид сверху)**



**Рисунок-2б. Si-рельефный вид поликристаллической пленки, выращенной на основе**



**Рисунок-2д. Si - 3D изображение поликристаллического слоя, выращенного на основе**



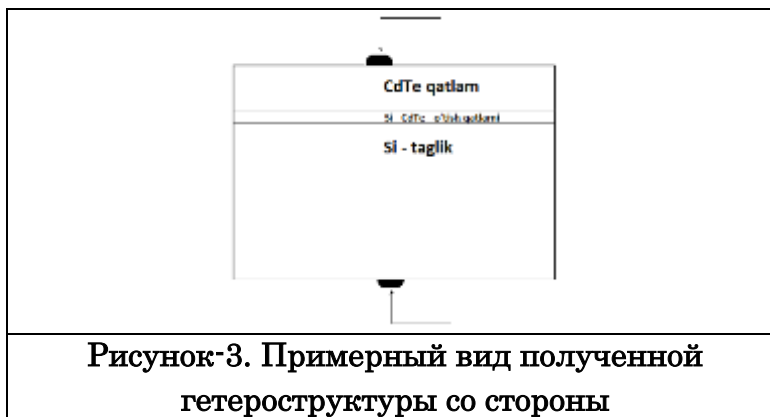
**Рисунок-2е. Распределение размеров выращенных зерен поликристалла (наибольший размер 780 Нм)**

Измерения проводились в нескольких точках. Из измерений зависимости химических элементов от толщины слоя видно, что результаты проведенных во всех направлениях измерений практически одинаковы, среднее отклонение не превышает 5%.

Результаты проведенных исследований показывают, что в переходном слое на участке толщиной 3 – 4 мкм образуется твердый раствор кремния – теллурида кадмия. В процессе роста слоя теллура кремнезем диффундирует в поверхностный слой основания ~1,0-1,5 мкм. В свою очередь, он также диффундирует в эпитаксиальный слой толщиной ~ 1 – 1,5 мкм. Это явление в данном случае обусловлено взаимной координацией кристаллической решетки и других физико – химических параметров кремниевого основания и растущего слоя, обеспечивающих последующее нарастание CdTe - слоя до Si - основания.

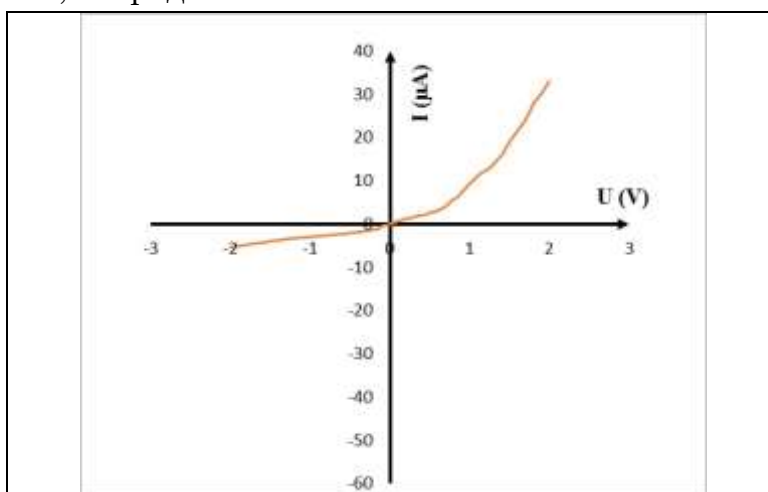
Была измерена вольт – амперная характеристика и чувствительность полученной гетероструктуры к влажности. барьер Шоттки был создан за счет удаления индия в

вакууме до p-Si-pCdTe - гетероструктуры (рис.3). Слой 500 нм, сильно спаянный, взят поверх CdTe-слоя. В этом случае температура Si-CdTe поддерживалась в диапазоне 90-120°C.



**Рисунок-3. Примерный вид полученной гетероструктуры со стороны**

Изучен ВАХ гетероструктуры p/Si-p/CdTe в темноте при комнатной температуре (рис.4). Анализ ВАХ показывает, что гетероструктура обладает выпрямляющим свойством в виде отношения прямого тока к обратному току при определенном значении напряжения с поправочным коэффициентом, определяемым в виде  $Q=I_{\text{forw}}/I_{\text{rev}}$ . Например, на 1,0 Вольт уходит около 2-2,5 порядка.



**Рисунок-4. p/Si-p/CdTe ВАХ при комнатной температуре гетероструктуры**

Вода, окружающая нас, является одной из составляющих окружающей нас атмосферы, одной из самых необходимых составляющих для всего живого: человека, животного и растительного мира.

Вода, крайне необходимая для жизни-будет желательна, если влажность поддерживается в определенном количестве. Проще говоря, процесс хранения на складах выращиваемой сельскохозяйственной продукции или выращиваемых сельскохозяйственных культур требует определенной оптимальной влажности в зависимости от различных периодов вегетации. Отсюда следует вывод, что требуется постоянно измерять влажность.

Для измерения влажности используются приемные и передающие приборы (датчики), работа которых основана на различных физических закономерностях и изготовлена по различным технологиям.

В основном можно выделить следующие типы датчиков:

- емкость: чрезвычайно прочный и надежный; дешево; широкий диапазон производительности;
- резистивный: самый дешевый на данный момент, миниатюрный по размеру.

Работа емкостных датчиков влажности основана на зависимости электрической емкости чувствительного элемента от влажности окружающей среды и вещества.

Принцип действия резистивных датчиков влажности основан на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента от влажности окружающей среды и вещества.

Наши исследования в основном проводятся на датчиках влагостойкости.

### ДАТЧИКИ ВЛАГОСТОЙКОСТИ

Сопротивление большинства зеркальных проводников будет зависеть от количества воды, содержащейся в них. На основе этого принципа создаются датчики влагостойкости.

Поглощение молекулы воды в разогретый слой приводит к изменению сопротивления между электродами (контактами), этот процесс регистрируется с помощью электронной схемы. Первый датчик влажности такого типа был создан - Ф.В.Данмором в 1935 году, его водоотталкивающий (влагонепроницаемый) слой состоял из (2-5)% раствора  $LiCl$  в воде. В этом случае используется свойство слоя впитывать воду. Гигроскопичный слизистый слой поглощает молекулы воды и ведет себя как электролит, способный проводить ток. Гигроскопичный слой  $LiCl$ , помещенный в датчик, поглощает водяной пар, содержащийся в атмосфере, и создает проводимость между электродами, что приводит к образованию электрического тока между электродами.

Изменение сопротивления датчика относительно относительной влажности, создаваемой на основе системы полупроводниковых слоев, погруженных в стекло, было рассмотрено в работе [7]. В этом исследовании толщина полупроводникового слоя составляла 330 Нм, измерения проводились на разных частотах (120 Гц и 1 кГц). При измерении в 120 Гц и 1 кГц сопротивление датчика уменьшалось с увеличением влажности от 50 до 95%, то есть, соответственно, в 450 и 550 раз. Было отмечено, что при толщине слоя 400Нм сопротивление датчика уменьшилось до 60 и 140 раз соответственно при проведении измерений без изменения вышеуказанных условий. Авторы объясняют, что более высокая чувствительность датчика, когда толщина полупроводникового слоя мала, связана с более высокой концентрацией влаги в тонкослойных образцах.

При этом сопротивление датчика уменьшается с увеличением частоты всего в 1,2 раза. Было отмечено, что при совместном воздействии влаги устойчивость снижается в среднем в 500 раз. Из этого следует вывод, что уменьшение сопротивления датчика или увеличение электропроводности полупроводникового слоя связано с увеличением концентрации носителей заряда.

Эффективная концентрация носителей заряда может увеличиваться за счет следующих факторов:

попадание молекул воды в полупроводниковый слой так же, как и в легирующий элемент, изменяет свойства слоя;

из-за перемещения зарядов возникает комплекс между молекулами полупроводника и воды в гетероструктуре;



участие в этом процессе полярно связанных молекул воды, ещё за счет участия молекул воды в процессе переноса зарядов, так как измерения проводились на переменном токе, что приводит к образованию сдвигового тока в твердых телах [8].

С целью исследования чувствительности к влаге внутри контактной системы с гетероструктурой и высокой проводимостью, созданной на основе Si-CdTe-системы, получаемой методом вакуумного стирания на основе твердого тела или полупроводника на основе кремниевого основания, проводящей электрический ток от себя. Между полученным слоем и кремниевой основой образуются, на наш взгляд, оксидные слои следующим образом: SiO, SiO<sub>2</sub> или CdO. Контролировать размер отросшего слоя, его толщину и размеры частиц поликристаллического слоя, и плотность их расположения на поверхности основания можно будет изменением размеров пор между поликристаллическими частицами, температуры основания и удаляемого источника, времени отслоения элементов, образующих слой, и расстояния между источником и основанием. Например, при повышении базовой температуры возможно уменьшение размеров выращиваемых частиц поликристаллов и увеличение плотности их оседания на поверхности основания.

Среднее значение поперечного сечения пор, содержащихся в поликристаллическом слое, должно было бы быть достаточным для прохождения молекул воды. Если принять молекулу воды за форму сферы, то ее размер  $\approx 2,7 \cdot 10^{-10}$  м.

Молекула CdO-растворима в воде. Данные были получены с помощью электродов, сжимающих контакты, взятые с помощью In-со стороны слоя и кремниевого основания.

Поры поликристаллического слоя CdTe и слоя оксида CdO поглощают молекулы воды, содержащиеся в воздухе. Согласно приведенным выше данным, количество молекул воды, поглощаемых слоем, прямо пропорционально парциальному давлению водяного пара и обратно пропорционально абсолютной температуре.

Удельное сопротивление получаемого слоя ( $10^6 - 10^8$ ) Ом·см в связи с тем, что а также в результате образования CdO с большим удельным сопротивлением, систему можно рассматривать как диэлектрический материал. Диэлектрическая проницаемость и удельное сопротивление слоя будут зависеть от количества поглощенной воды. Благодаря этому появляется возможность использовать новую полупроводниковую гетероструктуру в качестве чувствительного элемента датчиков влажности [Y]. Диапазон сопротивления резистивного элемента датчиков этого типа лежит в диапазоне от 1 кОм до 100 Мом [9].

Нам пришлось определить реакцию гетероструктуры, полученную в ходе наших исследований, на воздействие влаги. Полученные и проведенные опыты по-прежнему считаются первичными исследованиями.

Для этого была проведена первичная проверка зависимости значения тока от процентного содержания влаги. Проведены измерения VAX создаваемой гетероструктуры. Для этого в процессе полета было создано специальное устройство для поддержания количества влаги без изменений и проведены измерения.

На основе полученных результатов был проведен VAX гетероструктуры при различной влажности (рис.5).

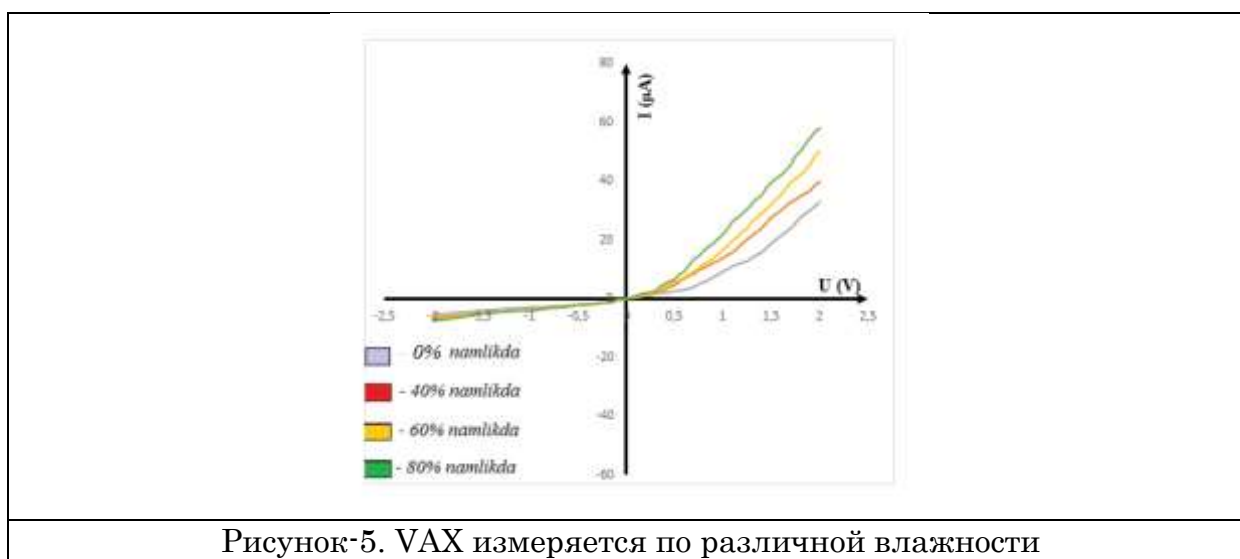
Из ссылки видно, что при увеличении содержания влаги в камере можно увидеть увеличение значения силы тока.

Нам пришлось определить реакцию гетероструктуры, полученную в ходе наших исследований, на воздействие влаги. Полученные и проведенные опыты по-прежнему считаются первичными исследованиями.

Для этого была проведена первичная проверка зависимости значения тока от процентного содержания влаги. Проведены измерения VAX создаваемой гетероструктуры. Для этого в процессе полета было создано специальное устройство для поддержания количества влаги без изменений и проведены измерения.

На основе полученных результатов был проведен VAX гетероструктуры при различной влажности (рис.5).

Из ссылки видно, что при увеличении содержания влаги в камере можно увидеть увеличение значения силы тока.



Недостатком резистивных датчиков является склонность их значений к сдвигу в процессе работы на конденсаторе, если используется водорастворимое покрытие, и достаточно большая зависимость от температуры, если они работают в среде с высокой переменной температурой.

Основные преимущества резистивных датчиков влажности: небольшие размеры, низкая стоимость, длительный срок службы из-за простоты метода извлечения. Срок службы этих датчиков может составлять от 5 лет и даже выше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из экспериментально полученных результатов измерений электрофизических свойств, проведенных с помощью микроанализаторов и в специальной камере, видно, что на самом деле на кремниевой подложке был нанесен слой теллурида кадмия. Между основанием и слоем образуется твердый раствор этих пар толщиной 3 – 4 мкм.

Из данных измерений VAX, проведенных в гетероструктуре, созданной на основе пары Si и CdTe, можно наблюдать чувствительность структуры к влаге. Если эти исследования будут доведены до конца и доведены до совершенства, можно будет создать датчики влажности, которые широко используются в различных отраслях народного хозяйства, включая сельское хозяйство.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen Z., Lu C. – Sens. Lett, № 3, p. 274-281, Mach 2005.
2. Korvink J.G., Chandran L., Boltshauser T. – Sens. Mater., № 4, p.323-328, April. 1999.
3. Rittersma Z.M., Splinter A., Bodecker A., Benecke W. – Sens. Actuators, v. B 68, C. 210-217, January. 2000.
4. Sapayev I.B., Saapayev B., Abdusattorov N.N., Hakimov D.S. Fotopriyomniki s upravlyayeim spektrom fotochuvstvitelnosti na osnove kremniya. Fizikafanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni (RIAK – XV). Toshkent 2022y, S.194 – 196.
5. I.B. Sapaev, Sh.A. Mirsagatov and B. Sapaev. The fabrication and investigation of n/CdS-p/CdTe-n/Si// Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika). 2011. № 4, pp.31-35.
6. I.B. Sapaev, Sh.A. Mirsagatov, B. Sapaev and M.B. Sapaeva. Fabrication and Properties of nSi-pCdTe Heterojunctions// Inorganic Materials, 2020, Vol. 56, No. 1, pp. 7–9.
7. X.S. Karimov, akademik AN X.S.Каримов, академик АН Республики Таджикистан Х.М.Ахмедов, К.Е.Чеонг\*\*, М.Салим\*, А.Ф.Мохд Нур\*, И.Муртаза\*. Резистивный датчик влажности на основе полупроводниковой наноструктуры. ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН, 2009, том 52, №1
8. Omar A.M. Elementary solid state physics: Principles and Applications. Singapore, Pearson Education Pte. Ltd., 2002, 468 с.
9. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2006. – 592 с.